

RAPPORT DE STAGE OBLIGATOIRE – STAGE LONG 2^{ÈME} SÉQUENCE

Janvier – juillet 2010

Effets de *Radopholus similis*, nématodes parasites des racines, sur le fonctionnement racinaire du bananier

Anne RODDE

Elève ingénieur agronome 2^{ème} année
Promotion 2007

Maître de stage : **Gaëlle DAMOUR**

Enseignant-tuteur : Jean ROGER-ESTRADE

Stage effectué au CIRAD, Guadeloupe, Station de Neufchâteau

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes auprès desquelles j'ai travaillé durant ces six mois. Je les remercie de m'avoir permis de m'intégrer au sein de la station de rendre cette expérience aussi enrichissante et intéressante.

Merci à Mylène, Christina, Jules, Steevy, Paul, Kelly, Dimitry, Joseph. Ce fut un plaisir de travailler à leurs côtés.

Merci à Gaëlle Damour qui m'a encadrée durant ce stage. Merci pour ses conseils, son temps et tout ce qu'elle m'a permis d'apprendre sur le thème de ses recherches mais au-delà également. Merci pour cette découverte du monde de la recherche.

Sommaire

1	INTRODUCTION	7
1.1	CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL DE LA CULTURE DE BANANE AUX ANTILLES.....	7
1.2	L'UPR SYSTÈME DE CULTURE BANANES, PLANTAINS ET ANANAS	8
1.3	OBJECTIFS DU STAGE.....	8
2	SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE.....	9
2.1	PRÉSENTATION SUCCINCTE DU BANANIER.....	9
2.2	LE SYSTÈME RACINAIRE DU BANANIER.....	9
2.3	RADOPHULUS SIMILIS, UN NÉMATODE ENDOPARASITE DES RACINES.....	10
2.4	EFFET DES NÉMATODES SUR LE DÉVELOPPEMENT DU BANANIER	10
2.5	ESTIMATION DES EFFETS DES NÉMATODES SUR LE SYSTÈME RACINAIRE	11
2.6	OBJECTIF ET QUESTIONS DE RECHERCHE	11
3	MATÉRIEL ET MÉTHODE.....	13
3.1	MATÉRIEL VÉGÉTAL ET DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL	13
3.2	BIOMASSES AÉRIENNE ET RACINAIRE	14
3.3	NOMBRE DE NÉMATODES	14
3.4	MORPHOLOGIE DU SYSTÈME RACINAIRE ET TAUX DE NÉCROSE	15
3.5	SURFACES FOLIAIRES.....	17
3.6	ESTIMATION DES PERTES EN EAU	17
3.7	TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNÉES.....	18
4	RÉSULTATS.....	21
4.1	LIEN ENTRE TRAITEMENTS ET DÉVELOPPEMENT DES POPULATIONS PARASITAIRES.....	21
4.2	EFFET DU PARASITISME TELLURIQUE SUR LE FONCTIONNEMENT DU BANANIER	21
4.2.1	<i>Croissance et morphologie racinaires</i>	<i>21</i>
4.2.2	<i>Croissance aérienne.....</i>	<i>25</i>
4.2.3	<i>Alimentation hydrique.....</i>	<i>27</i>
4.3	UTILISATION DE L'IMAGERIE RACINAIRE ET DU TAUX DE NÉCROSE RACINAIRE COMME INDICATEUR DE L'ÉTAT SANITAIRE DU BANANIER.....	29
4.3.1	<i>Parasitisme tellurique et taux de nécrose racinaire</i>	<i>29</i>
4.3.2	<i>Taux de nécrose et développement du bananier.....</i>	<i>29</i>
5	DISCUSSION	33
5.1	LIEN ENTRE TRAITEMENTS ET DÉVELOPPEMENT DES POPULATIONS PARASITAIRES.....	33
5.2	EFFET DU PARASITISME TELLURIQUE SUR LE FONCTIONNEMENT DU BANANIER	33
5.2.1	<i>Croissance et morphologie racinaires</i>	<i>33</i>
5.2.2	<i>Croissance aérienne.....</i>	<i>35</i>
5.2.3	<i>Alimentation hydrique.....</i>	<i>35</i>
5.3	UTILISATION DE L'IMAGERIE RACINAIRE ET DU TAUX DE NÉCROSE RACINAIRE COMME INDICATEUR DE L'ÉTAT SANITAIRE DU BANANIER.....	35
5.3.1	<i>Parasitisme tellurique et taux de nécrose racinaire</i>	<i>35</i>
5.3.2	<i>Taux de nécrose racinaire et développement du bananier</i>	<i>36</i>
6	CONCLUSION	39
7	BIBLIOGRAPHIE.....	41
8	ANNEXES	43
8.1	LA RECHERCHE AGRONOMIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT AU CIRAD	43
8.2	CONTEXTE ÉCONOMIQUE DE LA CULTURE DE BANANE AUX ANTILLES.....	44
8.3	LE PLAN BANANE DURABLE.....	46
8.4	PROTOCOLE D'EXTRACTION RACINAIRE	47
8.5	PROTOCOLE D'ÉLUTRIATION	48
8.6	TABLES D'ANOVA.....	50

1 Introduction

1.1 Contexte environnemental de la culture de banane aux Antilles

La culture de la banane est une culture de base dans l'alimentation mondiale. La production en 2006 s'élevait à 104 millions de tonnes, principalement en Inde et Afrique. Seulement 10% de cette production est destinée à l'exportation (source FAO 2007).

En 2005, la Guadeloupe et la Martinique ont exporté 50 000 t de banane vers l'Europe (source Agreste). Avec 10 000 emplois directs et indirects en Guadeloupe, cette production représente une source d'emplois importante aux Antilles (source Guadeloupe Informations). Pourtant, sa viabilité est devenue incertaine, à la fois sur le plan environnemental, économique et social.

En effet, la production de banane a longtemps reposé sur la pratique d'une monoculture intensive sur sol nu utilisant des volumes importants d'intrants et des cultivars à haute productivité, afin de rendre les états du milieu favorables à la croissance de la plante cultivée et de maximiser les rendements. Par exemple, la lutte contre les nématodes, parasites du système racinaire causant des nécroses et altérant l'ancrage et les capacités d'absorption hydrominérale, nécessite le recours à des nématicides qui participent à la pollution des eaux et altèrent la fertilité des sols. De manière générale, ces modes de production intensifs engendrent une simplification des agro-systèmes où un certain nombre de fonctions écosystémiques sont perturbées voire supprimées (régulation biologique des bio-agresseurs, fixation symbiotique d'azote atmosphérique, régulation des transferts hydriques,...). En conséquence, on observe souvent des dégradations de la fertilité des sols (prolifération du parasitisme tellurique, dégradation de la structure) et les impacts environnementaux négatifs sont importants (pollution de l'eau et de la terre, érosion, diminution de la biodiversité, etc...).

Aux Antilles, il faut en moyenne 4,3 kg de pesticides par hectare de plantation de bananiers. Bien que ce chiffre soit nettement inférieur aux autres pays producteurs de banane (près de 70 kg/ha au Costa Rica), il s'agit de diminuer cette consommation, en particulier dans le cadre des décisions du Grenelle de l'Environnement et du Plan Banane Durable (voir Annexe 8.3) de 2008 qui fixent une diminution de 50% de la consommation des pesticides d'ici 2013. La consommation de pesticides en bananeraie a déjà fortement diminué aux Antilles, puisqu'elle est passée de 10 kg/ha en 1996 à 4,3 kg/ha en 2003 (Davin, 2008), il s'agit de continuer dans ce sens.

L'enjeu pour la culture de banane consiste donc à passer de systèmes monocultureux intensifs conventionnels à des systèmes de culture plus durables, par la voie de l'intensification écologique.

L'intensification écologique s'oppose à l'intensification conventionnelle en se basant sur les principes de l'agroécologie : restaurer la fertilité biologique des sols et limiter l'impact des bioagresseurs par le rétablissement des équilibres écologiques dégradés. Les services écosystémiques ainsi rendus permettent de limiter l'utilisation d'intrants chimiques.

Différentes voies d'intensification écologiques des systèmes de culture sont envisagées et font l'objet de recherches au CIRAD. Parmi elles, l'utilisation de plantes de couverture en association ou en rotation pourrait, entre autres services, limiter le parasitisme tellurique. L'utilisation réduite d'intrants dans ces systèmes de culture conduira alors à devoir supporter une pression parasitaire non nulle.

1.2 L'UPR Système de culture bananes, plantains et ananas

Dans ce contexte, les travaux de l'unité « Système de culture bananes, plantains et ananas » du Cirad au sein de laquelle j'ai réalisé mon stage, doivent permettre de répondre aux nouveaux enjeux économiques et environnementaux de la culture de la banane. Il s'agit de permettre une meilleure maîtrise du recours aux intrants en proposant de nouveaux systèmes de culture plus durables.

Les recherches de l'unité se structurent en trois axes :

1. Dynamique des bioagresseurs et des communautés
2. États du milieu et fonctionnement de l'agro-système
 - Fonctionnement du compartiment sol en conditions d'intensification écologique
 - Effets des pratiques d'intensification écologique sur la dispersion des polluants
3. Conception et évaluation de systèmes de culture innovants

1.3 Objectifs du stage

Le stage proposé s'insère au niveau du deuxième axe de recherche de l'unité (État du milieu et fonctionnement de l'agro-système) qui vise à apporter les bases scientifiques nécessaires à la compréhension du fonctionnement et à la modélisation de systèmes de culture bananiers en conditions d'intensification écologique. Plus particulièrement, le sujet de ce stage a trait au fonctionnement racinaire du bananier en condition d'intensification écologique.

Le stage participe à deux aspects distincts des recherches menées, qui correspondent à deux essais que j'ai suivis :

- obtenir une meilleure compréhension de l'effet des nématodes parasites des racines, l'un des problèmes majeurs en bananeraie, et disposer d'un indicateur quantitatif de leur impact sur le fonctionnement de la plante (essai en pot sur jeunes bananiers – suivi sur son dernier quart)
- évaluer l'impact de l'introduction d'une plante de couverture (soja pérenne, *Neotonia wightii*) en association avec le bananier sur la répartition et la morphologie du système racinaire du bananier (essai en bananeraie de premier cycle - suivi de la plantation jusqu'au 5^{ème} mois)

Le choix a été fait de ne traiter dans ce rapport que du premier essai, sur les effets des nématodes sur le système racinaire du bananier, afin de disposer de données suffisantes pour en faire une exploitation satisfaisante.

2 Synthèse bibliographique

2.1 Présentation succincte du bananier

Le bananier est une herbe monocotylédone tropicale semi-pérenne appartenant au genre *Musa*. Les bananiers cultivés sont triploïdes, stériles, et parthénocarpiques. Ils ont été obtenus par croisement et recombinaisons de deux espèces sauvages diploïdes, *Musa acuminata* (génome AA) et *Musa balbisiana* (génome AB). Les bananes dessert sont issues du groupe *acuminata* (AAA) et les bananes plantains, du groupe *acuminata*balbisiana* (AAB).

La hauteur du bananier varie entre 1,5 et 8 m selon les variétés et les conditions de croissance. Les feuilles et racines principales sont insérées sur une tige souterraine, appelé bulbe ou souche. Le pseudo-tronc est formé par l'empilement des gaines foliaires. Après une vingtaine de feuilles, le méristème apical développe une tige florale appelée hampe, à l'extrémité de laquelle se trouvent les fleurs, regroupées en étages florifères ou mains. Les premiers étages portent les fleurs femelles parthénocarpiques, qui donneront des fruits par croissance ovarienne. Les étages suivant portent des fleurs hermaphrodites, puis des fleurs mâles qui dégénèrent. Le bulbe produit des rejets, par bourgeonnement axillaire, dont un seul est sélectionné. Le rejet remplace le pied-mère qui dégénère et assure la production l'année suivante. Plusieurs cycles peuvent ainsi se succéder. En production intensive, les bananiers sont replantés en moyenne après 4 à 5 cycles pour éviter une baisse de production et un trop grand décalage des cycles.

2.2 Le système racinaire du bananier

Contrairement au système racinaire pivotant des dicotylédones, le système racinaire des monocotylédones est adventif. Les racines du bananier sont produites par la tige (le bulbe) au niveau de la couche de Mangin (Dorel, 1989). Elles se développent dans plusieurs directions (système racinaire polyaxial) et le nombre de directions augmente au cours du développement (Lecompte, 2002). Le système racinaire du bananier est très hiérarchisé : plus l'ordre racinaire est élevé, plus les racines sont courtes et fines (Lecompte, 2002).

Les nouvelles racines sont toujours initiées sur le bulbe au dessus des précédentes. Le système racinaire du bananier se développe ainsi principalement dans les horizons superficiels du sol (Fogain *et al.*, 2005). Une expérimentation menée en Uganda sur des bananiers de type *Musa* AAA a montré que 90% de la biomasse racinaire se trouvait dans les 30 premiers centimètres du sol (Kashaija *et al.*, 2004). Les racines dépassant 70 cm de profondeur sont rares. Les racines de bananier étant très sensibles à la résistance mécanique du sol (Lecompte *et al.*, 2003), ce schéma d'exploration racinaire est étroitement lié à la densité apparente du sol (Delvaux *et al.*, 1989).

La vitesse de croissance racinaire est variable selon les milieux. Elle est de l'ordre de 2 à 4 cm par jour (Dorel, 1989). Le diamètre basal des racines primaires varie de 2 à 10 mm, ce diamètre augmentant avec l'âge du plant (Lecompte *et al.*, 2002).

Des bananiers de grande taille sont donc supportés par des systèmes racinaires assez peu importants et assez superficiels. Pourtant, par son rôle d'ancrage et de nutrition, le système racinaire du bananier joue un rôle particulièrement important et toute altération, en particulier par des parasites, peut avoir des conséquences fortement dommageables pour la plante.

L'étude du système racinaire est complexe. Elle nécessite une excavation ou un dépotage des plants, selon que l'essai est mené en plein champ ou en pot, puis un tri minutieux des racines restant dans le volume de sol exploré. Il existe également des dispositifs plus complexes, en rhizotron, permettant des observations non destructives, répétables mais cependant perturbatrice du milieu de croissance des racines. A l'heure actuelle, la seule alternative à

l'excavation est d'effectuer un certain nombre de prélèvements de racines (par carottage), à certaines positions autour du pied, déterminés sur la base d'excavation préliminaires. Cependant, cette méthode se base sur un schéma d'enracinement type, ne prend donc pas en compte des éventuelles modifications de l'enracinement et ne reste qu'une méthode d'estimation de la biomasse racinaire au champ.

2.3 *Radophulus similis*, un nématode endoparasite des racines

Radophulus similis (Tylenchida, Pratylenchidae) est le principal nématode parasite des racines de bananier (90% de la population de nématodes (Moens *et al.*, 2001, Araya *et al.*, 2002). Parmi les autres nématodes s'attaquant au bananier, on trouve *Helicotylenchus spp.*, *Meloidogyne spp.* et *Pratylenchus spp.* (Araya *et al.*, 2002).

Radophulus similis est un nématode endoparasite, c'est-à-dire qu'il pénètre dans les racines, dont il se nourrit et où il vit toute son existence, mais dans lesquelles il peut également migrer. Les populations de *Radophulus similis* se trouvent principalement dans les 30 premiers centimètres du sol, et ne sont pas présentes en dessous de 50 cm (Kashaija *et al.*, 2004). D'autres nématodes se rencontrent jusqu'à 60 cm mais la plupart des nématodes et des dégâts observés le sont entre 20 et 40 cm de profondeur (Fogain *et al.*, 2005), là où se trouvent la majorité des racines de bananier.

2.4 Effet des nématodes sur le développement du bananier

Les nématodes parasites des racines se nourrissent des racines dans lesquelles ils pénètrent par des lésions, qui se développent ensuite en nécroses repérables par leur couleur bleue-violacée. Bien que les nécroses ne soient pas seulement dues aux nématodes, mais aussi à des colonisation secondaires par des champignons (tels *Cylindrocladium*), une corrélation entre le log du nombre de nématodes dans 100g de racines et la proportion de nécroses sur les racines de bananier a été mise en évidence par Moens *et al.* (2001).

Les nématodes sont reconnus pour entraîner une diminution de la croissance racinaire. Il a en effet été montré sur le bananier et le trèfle que les nématodes entraînent une diminution de la longueur du système racinaire latéral (Mukasa *et al.*, 2006, Treonis *et al.*, 2007). Le stock de ressources accessibles par le bananier est donc diminué par le parasitisme tellurique.

Les nématodes parasites peuvent également avoir un effet au niveau des paramètres physiologiques intervenant dans l'acquisition de ces ressources. Ils peuvent diminuer la conductance stomatique et les échanges gazeux (Kirkpatrick *et al.*, 1995). Ils peuvent aussi affecter la conductivité racinaire et diminuer le potentiel hydrique racinaire (Wilcox *et al.*, 1986), ce qui perturbe l'absorption hydrominérale (Araya *et al.*, 2005). Les capacités de prélèvement des ressources par la plante peuvent donc être diminuées mais des effets assez contrastés sont observés dans la littérature.

Les effets sur les caractéristiques morphologiques du système racinaire, telles que le nombre de racines primaires, les diamètres, la densité de ramification, les réitérations au niveau de la racine nécrosée, et la biomasse racinaire totale ne semble pas faire l'objet d'un consensus. Nous avons vu précédemment, sur bananier et trèfle, que la longueur du système racinaire latéral était diminuée, cependant aucune diminution de biomasse racinaire n'a été constatée. Ceci indique que la morphologie générale du système racinaire de ces deux plantes est modifiée par les nématodes.

Contrairement à ce qui pourrait être attendu, les effets résultant sur la croissance aérienne sont parfois contradictoires. Par exemple, aucun effet des nématodes sur la croissance aérienne et la biomasse aérienne n'a pu être montré sur la vigne, la fétuque et le trèfle (Sasanelli *et al.*, 2006, Verschoor *et al.*, 2002). Ceci peut s'expliquer par la diversité des études présentées ci-dessus : d'une part, elles ont été menées dans des conditions de culture différentes, et d'autres

part, elles se sont intéressées à des espèces différentes, de sensibilités aux paramètres biologiques et/ou à un stress nutritionnel différents. Or, si toutes les conditions nutritionnelles sont optimales, un système racinaire à la fonctionnalité réduite aura peu d'impact sur la croissance générale de la plante. Au contraire, cet impact sera fort si les conditions deviennent limitantes.

2.5 Estimation des effets des nématodes sur le système racinaire

Dans la plupart des publications, les dégâts causés par les nématodes sont estimés de manière qualitative au moyen d'index. Ces index peuvent servir à planifier les applications de nématicides. Le Tableau 1 présente différents index basés sur une appréciation visuelle du taux de nécrose sur des sections longitudinales de racines (Moens *et al.*, 2001).

Tableau 1 : Différents index d'appréciation qualitative de l'impact des nématodes sur les racines (appréciation sur des sections longitudinales de racines) (Moens *et al.*, 2001)

Index	Classes de dégâts	Calcul de l'index
Australien	0% de nécroses = classe 0 ; 0 < 25% = 1 ; 25-50% = 3 ; 50-75% = 5 ; 75% = 7	[Somme des classes / (nombre de racines * 7)] * 10 (au lieu de 100 pour faciliter la présentation des résultats)
Bridge et Gowen	0% de nécroses = classe 0 ; 1-25% = 1 ; 26-50% = 2 ; 51-75% = 3 ; 76-100% = 4	Moyenne du produit des classes de nécroses par le nombre de racines de cette classe
Local		Moyenne pour toutes les racines de l'échantillon des [(Longueur cumulée des nécroses sur les deux moitiés longitudinales de la racine (cm) / 2) * longueur du segment]

D'autres index sont simplement basés sur une observation en surface des racines. Par exemple, Araya et De Waele (2005) utilisent la moyenne des classes de nécrose suivantes : 0 : aucune lésion ; 1 : 1-20% de surface nécrosée ; 2 : 21-40% ; 3 : 41-60% ; 4 : 61-80% ; 5 : 81-100%.

L'état sanitaire des racines peut aussi être schématiquement exprimé par la valeur du rapport S/N, correspondant au nombre de racines saines divisé par celui de racines nécrosées observées sur un profil (Delvaux *et al.*, 1989). Ce rapport diminue avec l'âge de la bananeraie ce qui signifie que les nécroses racinaires augmentent au cours des cycles de culture. Ce résultat est certainement à relier à la mortalité racinaire.

A notre connaissance, aucune méthode purement quantitative de caractérisation de l'attaque parasitaire, comme l'exploitation d'images racinaires choisie ici, n'a été utilisée.

2.6 Objectif et questions de recherche

L'objectif de cette étude a été double : i) déterminer l'impact de *Radopholus similis* sur le fonctionnement racinaire du bananier (objectif cognitif), ii) vérifier que les images racinaires et le taux de surfaces nécrosées pouvaient être un bon indicateur de l'impact des nématodes sur le fonctionnement du bananier (objectif méthodologique).

Afin de s'affranchir des contraintes expérimentales relatives à l'estimation correcte de la biomasse racinaire et de la quantité de nématodes en champ, l'essai a été mené en pots.

Pour répondre aux objectifs délimités ci-dessus, les questions et hypothèses suivantes ont été traitées :

→ Quel est l'effet des nématodes sur le fonctionnement du bananier ?

Dans un premier temps, il s'agira de mettre en évidence un lien entre parasitisme tellurique et effets sur le fonctionnement de la plante, en étudiant différentes caractéristiques telles que la croissance aérienne, la croissance racinaire, la morphologie racinaire et l'alimentation hydrique.

Un certain nombre d'hypothèses seront testées :

- Le parasitisme tellurique diminue la croissance racinaire, en particulier celle des racines latérales.
- Le parasitisme tellurique modifie la morphologie du système racinaire, en touchant plus particulièrement les racines fines qui sont plus souples et faciles à pénétrer.
- Le parasitisme tellurique diminue la croissance aérienne.
- Le parasitisme tellurique diminue l'alimentation hydrique de la plante. Les pertes en eau par transpiration de la plante diminuent (effet direct dû à la diminution de surface foliaire). Les pertes en eau par unité de surface foliaire diminuent (effet indirect dû au stress provoqué par le parasitisme)

→ Les images racinaires et le taux de nécroses sont-ils de bons indicateurs de l'état sanitaire de la plante et de l'impact des nématodes sur son fonctionnement ?

Il faudra tout d'abord vérifier le lien entre parasitisme tellurique et taux de nécrose, puis étudier si le taux de nécrose suffit à expliquer les effets observés sur le fonctionnement de la plante.

Pour cela, les hypothèses suivantes ont été testées :

- Il existe une corrélation entre le taux de nécrose et le nombre de nématodes.
- Le parasitisme tellurique diminue la surface racinaire fonctionnelle.
- Il existe une corrélation entre le taux de nécrose et les différentes caractéristiques de fonctionnement de la plante (croissance racinaire, aérienne, alimentation hydrique, etc...)

3 Matériel et méthode

3.1 Matériel végétal et dispositif expérimental

L'essai s'est déroulé sur la station du CIRAD à Neufchâteau, Sainte Marie, en Guadeloupe. Des vitroplants de *Musa acuminata* cv. Grande Naine (clone commercial 902, sous groupe Cavendish, triploïde AAA) ont été élevés en plaques alvéolées de 10 cm³ en serre insecproof pendant 6 semaines. Le 21/10/2009, 128 de ces vitroplants ont été plantés en pots de 4L, emplis de terre stérilisée (andosol à texture argileuse), et transféré dans une autre serre (température moyenne : 24°C, rayonnement moyen : 8.25 MJ/m², humidité moyenne : 85%). Les plants ont été maintenus à la capacité au champ et un fertilisant à diffusion lente (osmocote : 11N, 11P, 18K, 2Mgo) a été appliqué.

Le 1^{er} décembre, soit six semaines après la plantation en pot, huit plants ont été isolés pour procéder à un 1^{er} dépotage. Les plants restant ont été répartis selon trois traitements (40 plants par traitement) et inoculés avec les doses suivantes de *Radophulus similis* :

- Dose nulle (**traitement témoin 0**)
- 1000 nématodes par pot (**traitement 1**)
- 100 nématodes par pot (**traitement 2**)

Afin d'estimer la transpiration des plants, la surface des pots a été couverte hermétiquement pour éviter les pertes en eau par évaporation du sol (Figure 1). Chaque pot a été pesé tous les deux jours, puis arrosé. Dans un premier temps, et par soucis de simplification de l'arrosage, la dose d'eau apportée pour chaque traitement a été calculée sur la base du poids moyen d'eau perdu par quatre pots par traitement. Constatant une légère hétérogénéité de développement entre plants, il a été décidé le 24/12/2009 de ramener les pots à leur poids initial, c'est-à-dire à la capacité au champ, pour éviter l'apparition d'un stress hydrique.



Figure 1 : Dispositif expérimental

Huit plants par traitement ont été dépotés toutes les quatre semaines (28 décembre – 2^{ème} dépotage, 25 janvier – 3^{ème} dépotage, 22 février - 4^{ème} dépotage) afin de déterminer les biomasses aérienne et racinaire, les quantités de nématodes dans le sol et les racines, la morphologie racinaire et le taux de nécroses racinaires. Quelques plants au développement très faible ont été écartés dans chaque traitement. Les surfaces foliaires ont été suivies entre le 28 janvier et le 22 février.

3.2 Biomasses aérienne et racinaire

Pour chaque pot, le plant et ses racines primaires ont été dégagés précautionneusement. Les racines et l'ensemble feuilles, pseudo-tronc et pseudo-bulbe (considéré comme le compartiment aérien) ont été séparés puis pesés. Le compartiment aérien a été mis à l'étuve (70°C jusqu'à stabilisation du poids) pour en déterminer le poids sec et le pourcentage de matière sèche.

Environ 200 g de terre exempts de racines ont été réservés pour analyser les nématodes du sol. Le reste de la terre a été trié sous l'eau et à l'aide d'un tamis pour récupérer l'ensemble des racines fines restées dans le sol. Le poids frais de l'ensemble du système racinaire (racines primaires séparées du pseudo-bulbe + racines fines triées) a été mesuré. Pour les 3^{ème} et 4^{ème} dépotages, les racines primaires et certaines secondaires ayant commencé à clairement se différencier des autres racines de part leur diamètre (et potentiellement leur structure), grosses racines (diamètre supérieur à 1 mm) et racines fines (diamètre inférieur à 1 mm) ont été distinguées et pesées séparément. Par la suite, le terme « grosse racine » regroupera donc des racines primaires, mais pas uniquement.

Le système racinaire de cinq plants par traitement a été réservé pour les analyses nématologiques. Les racines correspondant aux trois plants restants par traitement ont permis de déterminer le pourcentage de matière sèche du système racinaire total, ainsi que celui des grosses racines et racines fines pour les dépotages 3 et 4. Chacun de ces échantillons - ou aliquote de ces échantillons, ont été pesés puis mise à l'étuve (70° C jusqu'à stabilisation du poids). Le poids sec a été mesuré et le pourcentage en matière sèche déterminé.

3.3 Nombre de nématodes

Extraction active des échantillons de racines :

Les nématodes contenus dans les cinq échantillons de racines par traitement et par date non mis à l'étuve ont été isolés par extraction active. Les racines ont été lavées et broyées, puis passées à travers plusieurs tamis de diamètre décroissant (200-80-50-25 µm). Entre chaque tamis, les échantillons sont centrifugés et le surnageant (obtenu en utilisant du kaolin ou du sulfate de magnésium) contenant les nématodes est conservé. Les nématodes sont ensuite dénombrés sous microscope pour obtenir le nombre de nématode rapporté au gramme de racines fraîches. Le nombre de nématodes dans les racines de chaque plant est ensuite calculé connaissant la biomasse racinaire de chaque plant.

Élutriation des échantillons de sol :

Les nématodes contenus dans le sol ont été isolés par élutriation. Après tri des racines, un volume de 300 ml de sol tamisé (préalablement pesé) est passé sous un courant d'eau. Un tamis (diamètre 1 mm) permet de séparer les éléments les plus grossiers qui sont éliminés. Le reste du sol en solution est passé dans une colonne d'élutriation contenant trois tamis successifs (diamètre 50 µm) et soumis à un débit d'eau (pression 70 bar) pendant 20 min. Les éléments grossiers sont entraînés au fond de la colonne. Les éléments les plus légers, dont les nématodes, sont récupérés en haut de la colonne. Les nématodes de trois échantillons d'un millilitre de ce surnageant sont comptés pour obtenir le nombre de nématodes pour 100 g de

sol sec. Le nombre de nématodes dans chaque pot est ensuite calculé connaissant le poids de sol dans les pots.

Les protocoles détaillés de ces manipulations sont en annexes 8.4 et 8.5.

Au cours de leur vie, les nématodes peuvent se retrouver soit dans les racines, pour se nourrir et se reproduire, soit dans le sol, pour se déplacer et coloniser d'autres racines. Le nombre de nématodes dans le sol de chaque pot, ne devrait donc pas être directement relié au nombre de nématodes dans les racines de chaque plant. Ces deux variables peuvent être linéairement reliées aux 2^{ème} et 3^{ème} dépotages (28/12/09 et 25/01/10), cependant, elles semblent indépendantes au 4^{ème} dépotage (Figure 2). Par la suite, on s'intéressera au **nombre de nématodes total par plant**, obtenu en sommant les nombres de nématodes dans le sol par pot et dans les racines par plant.

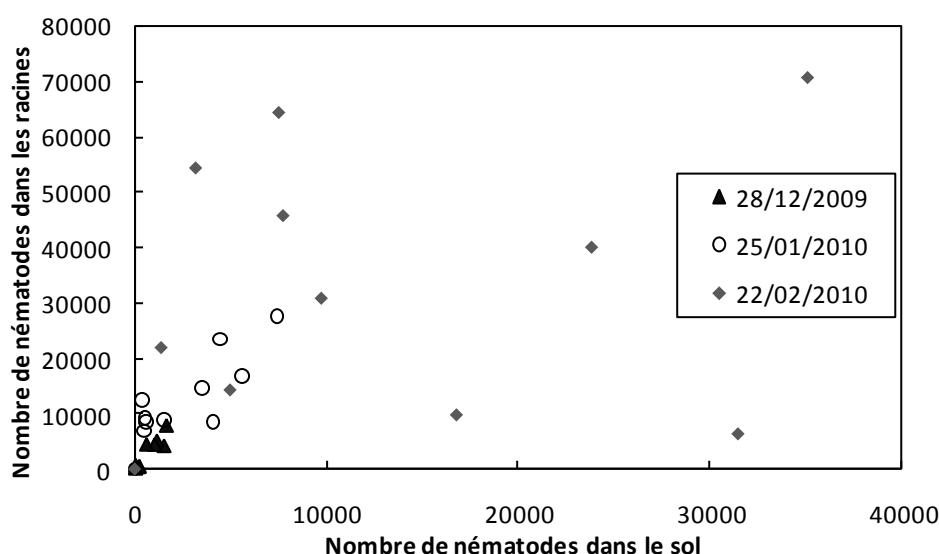


Figure 2 : Nombre de nématodes par plant dans les racines en fonction du nombre de nématodes par plant dans le sol selon les dates de dépotage

3.4 Morphologie du système racinaire et taux de nécrose

On a vu au 2.5 que dans la plupart des études, l'impact des nématodes sur les racines est mesuré de manière qualitative. Dans cette étude, nous cherchons au contraire à le quantifier à l'aide de la mesure des surfaces racinaires saines et nécrosées, et au calcul du taux de nécrose, qui correspond au rapport entre la surface racinaire nécrosée et la surface racinaire saine. Ces surfaces, ainsi que les diamètres racinaires, sont estimés au moyen d'analyses d'images racinaires obtenues à l'aide du logiciel WinRhizo (WinRhizoPro, version 2009).

Avant d'être mises à l'étuve pour estimation du poids sec, les aliquotes de racines ont été scannées en immersion dans un bac transparent rempli d'eau (hauteur 10 mm). Les scans ont été effectués par réflectance, sur fond bleu pour accroître les contrastes fond-racines.

Une résolution de 200 dpi a été utilisée, sauf pour les racines fines des 3^{ème} et 4^{ème} dépotages, devenues très abondantes et pour lesquelles une résolution de 400 dpi a été préférée.

Les racines ont été disposées sur la plaque en évitant au maximum les chevauchements. Les plus gros débris végétaux ont été enlevés. Les chevauchements et débris n'ayant pu être éliminés sont considérés comme négligeables. De plus, le faible biais ainsi introduit est similaire pour tous les scans et ne remet ainsi pas en cause les comparaisons entre traitements.

Les analyses ont été faites en couleurs, avec le même jeu de paramètres utilisé pour tous les scans (tableau 1).

Tableau 2 : Paramètres de l'analyse des images racinaires avec WinRhizo

- Preferences	Par défaut
- Measurements	
○ Overlapping	Non
○ Root morphology	
▪ Diameter	Interpolation
▪ Precision	Low
▪ Tennant method	Non
▪ Crossing detection	Normal
<i>Le niveau de détection des chevauchements de racines a été fixé comme « normal » car un niveau « none » entraînait une diminution d'environ 2% de la longueur racinaire.</i>	
○ Link analysis	Non
○ Fractals	Non
- Filters	
○ Image smoothing	Aucun
<i>Aucun lissage des images n'a été effectué car il perturbait la détection des racines fines, très nombreuses dans notre essai.</i>	
○ Debris removal	
▪ Area smaller than	Aucun
▪ L/W smaller than	Aucun
<i>La fonction permettant d'écarter les débris de l'analyse n'a pas été utilisée car elle éliminait également de l'analyse certaines racines fines. Comme expliqué plus haut, on a enlevé à la main les plus gros débris et on considère que l'erreur commise sur la mesure de la longueur racinaire due à ces débris est la même pour tous les scans</i>	
- Pixels classification	Couleur

Pour l'analyse en couleur des images racinaires, chaque pixel est classé dans la catégorie « healthy », « disease » ou « background » dont sa couleur est la plus proche. Les classes de couleur de ces trois catégories ont été définies par une dizaine de couleurs choisies à partir de quelques scans représentatifs de l'ensemble des échantillons. Deux classes de couleurs ont été définies, selon que l'analyse visait à obtenir les longueurs, diamètre et volume racinaires, ou bien les surfaces saines et nécrosées. En effet, les racines nécrosées et l'ombre des grosses racines sur le fond de couleur bleue étant de couleurs similaires, la classe de couleur définie pour pouvoir différencier de manière précise les surfaces saines et nécrosées entraînait une surestimation de la longueur racinaire. L'utilisation de palettes de classes de couleurs distinctes a donc été préférée.

Détermination des longueurs, diamètres et volumes racinaires

L'analyse de toutes les images racinaires est réalisée avec les paramètres décrits plus haut et les classes de couleurs établies pour la détermination des longueurs. Les données de longueur, diamètre moyen sain et diamètre moyen nécrosé sont extraites du fichier de sortie produit.

Dans les cas où il y a plusieurs scans pour un même bananier, les longueurs provenant des différents scans d'un même plant sont sommées. Le diamètre moyen par plant (sain, nécrosé

ou total) est calculé en sommant les diamètres moyens provenant des différents scans, pondérés par les longueurs racinaires (saines, nécrosées ou totales) respectives.

Les longueurs et diamètres ainsi obtenus ne concernent que les aliquotes du système racinaire analysées. La longueur totale du système racinaire est obtenue par proportionnalité via le rapport (*poids de l'aliquote de racines scannées / poids total du système racinaire*), ou les rapports (*poids de l'aliquote de racines fines scannées / poids total des racines fines du système racinaire*) et (*poids de l'aliquote de grosses racines scannées / poids total des grosses racines du système racinaire*) selon qu'il s'agisse d'images de grosses racines ou de racines fines. Les données de l'aliquote concernant les diamètres moyen sont considérées comme étant représentatives de l'ensemble du système racinaire et sont donc conservées sans modification.

Détermination du taux de nécrose

L'analyse de toutes les images racinaires a été réalisée avec les paramètres décrits plus haut et les classes de couleurs établies pour la détermination des surfaces. Les données de surfaces projetées saines et nécrosées ont été extraites du fichier de sortie produit.

Dans les cas où il y avait plusieurs scans pour un même bananier, un taux de nécrose pour les grosses racines a été calculé en sommant les surfaces saines et nécrosées provenant des différents scans de grosses racines d'un même bananier (idem pour les racines fines et la totalité des racines).

3.5 Surfaces foliaires

L'émergence des feuilles a été suivie tous les deux jours entre le 28 janvier et le 22 février. Le développement du cigare ainsi que l'état sanitaire des feuilles ont été notés à l'aide d'un coefficient allant de 0 à 1. La surface des feuilles a été mesurée au fur et à mesure de leur émergence.

3.6 Estimation des pertes en eau

Les pertes en eau des pots sont connues tous les deux jours entre le 1^{er} décembre et le 22 février via la pesée des pots et la différence avec leur poids initial. Les données brutes ont été corrigées : les valeurs aberrantes ont été enlevées et les valeurs négatives ramenées à zéro.

Les pertes en eau ont été pondérées par la biomasse aérienne et la surface foliaire pour s'affranchir de l'effet des nématodes sur la croissance de la plante.

La surface foliaire a été suivie tous les deux jours entre le 28 janvier et le 22 février comme indiqué au 3.5. Les pertes en eau ont donc été pondérées par la surface foliaire entre ces deux dates.

La biomasse aérienne est connue pour 8 plants à la 1^{ère} date de dépotage (avant différenciation des traitements), puis pour 8 plants par traitement, aux 3 dates de dépotage suivant. La croissance aérienne est de type logistique mais une approximation linéaire est possible pour les premiers stades. Une régression linéaire de type $BM(t) = a.t + b$, avec t le temps en jours depuis le début de l'expérimentation (01/12/09 = jour 1), a été réalisée (Figure 3). Les coefficients de détermination R^2 étant très bons, ce modèle linéaire pour l'évolution de la biomasse aérienne a été accepté et il a permis d'approximer la biomasse aérienne pour chaque date de pesée entre le 1^{er} décembre et le 22 février. Les pertes en eau ont ainsi été pondérées par la biomasse aérienne entre ces deux dates.

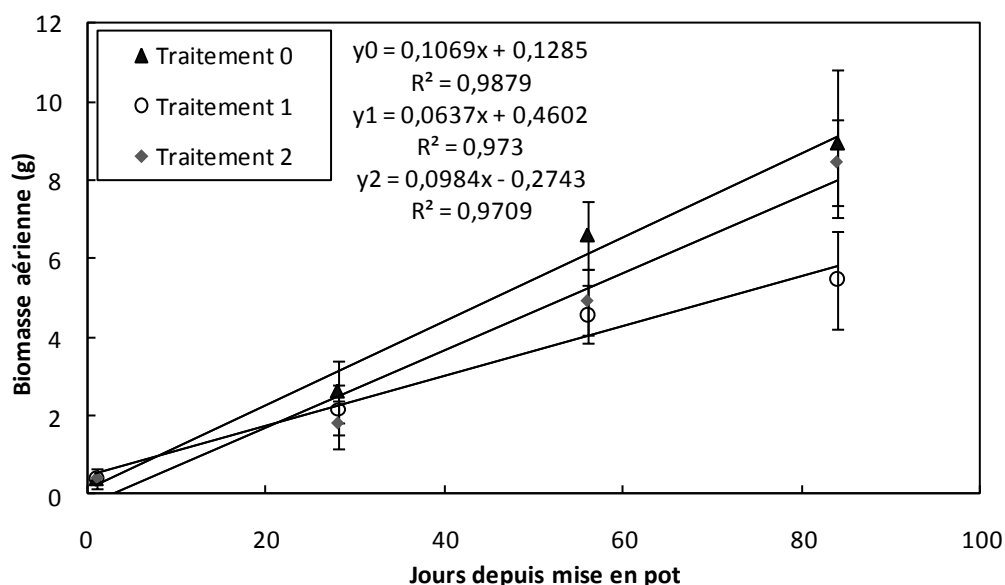


Figure 3 : Régression linéaire de la biomasse aérienne en fonction du nombre de jours après la mise en pot, par traitement

3.7 Traitement statistique des données

La régression entre la biomasse aérienne et le nombre de jours depuis le début de l'expérimentation a été effectuée sous Excel. La relation entre le taux de nécrose et le logarithme du nombre de nématodes total par plant a été analysée par régression linéaire avec Excel, ainsi que les relations entre les différentes caractéristiques de fonctionnement de la plante et le taux de nécrose.

Sur les données issues des dépotages, les effets « traitement » et « date » (date de dépotage) ont été testés à l'aide d'une ANOVA à deux facteurs effectuée avec le logiciel R (R 2.9.0). Des transformations par passage au logarithme décimal ont été faites lorsque l'étude des résidus a révélé que les hypothèses de base (normalité, linéarité, homoscedasticité, indépendance) n'étaient pas vérifiées. Pour une date donnée, les différences entre traitements ont été testées à l'aide d'une ANOVA à un facteur. De même pour les différences entre dates pour un traitement donné. Les tables d'ANOVA sont regroupées en annexe 8.6. Les différences significatives ont été analysées par comparaison multiple de moyenne de Tukey (Tukey Honest Significant Difference).

Les pertes en eau et les surfaces foliaires ont été suivies sur plusieurs semaines sur les mêmes bananiers. Les mesures ne sont donc pas toutes indépendantes et un modèle à effets fixes seuls ne peut plus être utilisé. Les effets « traitement » et « date » ont alors été testés avec un modèle linéaire mixte à l'aide du logiciel R (fonction lme, package nlme) avec des effets fixes associés au traitement et à la date, et des effets aléatoires associés au bananier.

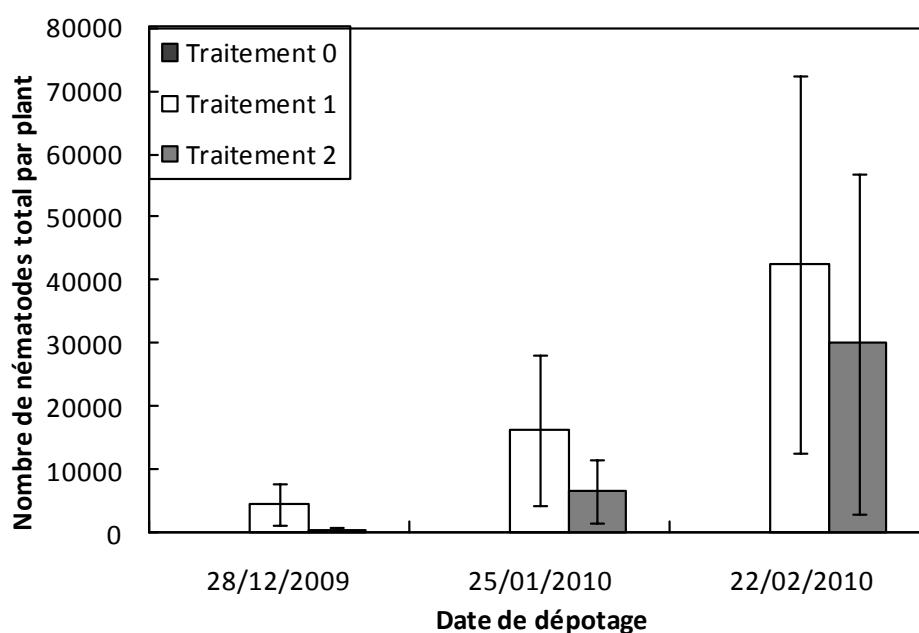


Figure 4 : Évolution du nombre de nématodes par plant par traitement

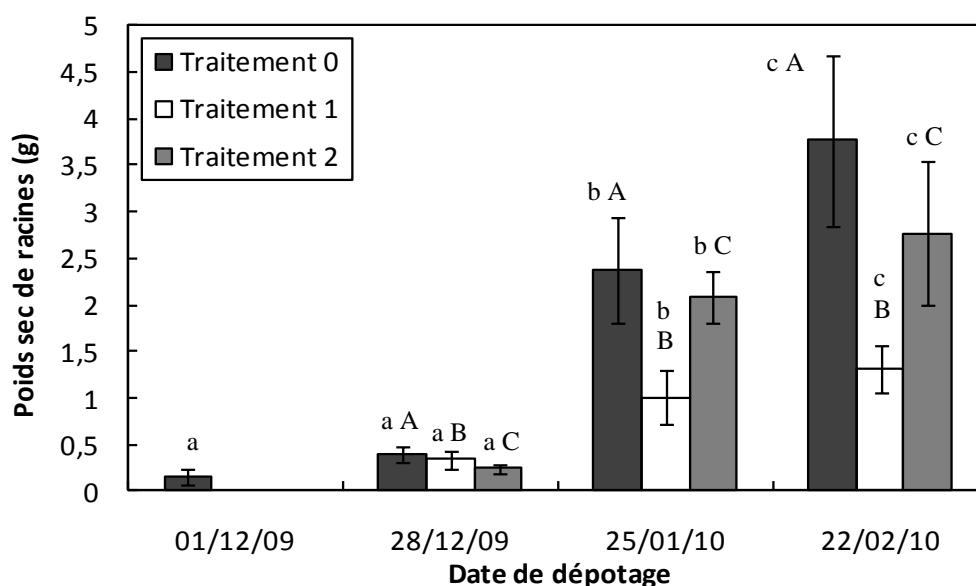


Figure 5 : Évolution du poids sec de racines par traitement et par date de dépôtage. Pour chaque traitement, les dates significativement différentes sont repérées par des lettres minuscules différentes (test de Tuckey, $p < 0,05$). Pour chaque date, les traitements différents sont repérés par des lettres majuscules différentes (test de Tuckey, $p < 0,05$).

4 Résultats

4.1 Lien entre traitements et développement des populations parasitaires

Le nombre de nématodes total par plant dans le traitement 1 est supérieur à celui dans le traitement 2 (Figure 4). Cependant, le nombre de nématodes par plant est très variable entre plants d'un même traitement.

Du fait de cette forte variabilité, les liens éventuels entre nombre de nématodes et variables relatives au fonctionnement de la plante n'ont pas pu être mis en évidence. La suite des résultats s'attachera à présenter l'effet global des traitements sur ces variables.

4.2 Effet du parasitisme tellurique sur le fonctionnement du bananier

4.2.1 Croissance et morphologie racinaires

4.2.1.1 Biomasse racinaire

La biomasse racinaire augmente de manière significative au cours du temps pour chaque traitement (exception faite du traitement 0 entre le 01/12/09 et le 28/12/09) (Figure 5).

Pour les dates du 25/01/10 et 22/02/10, la biomasse racinaire du traitement 0 est supérieure à celle du traitement 2, qui est supérieure à celle du traitement 1, ce qui suggère une biomasse racinaire plus faible en présence de parasitisme par les nématodes.

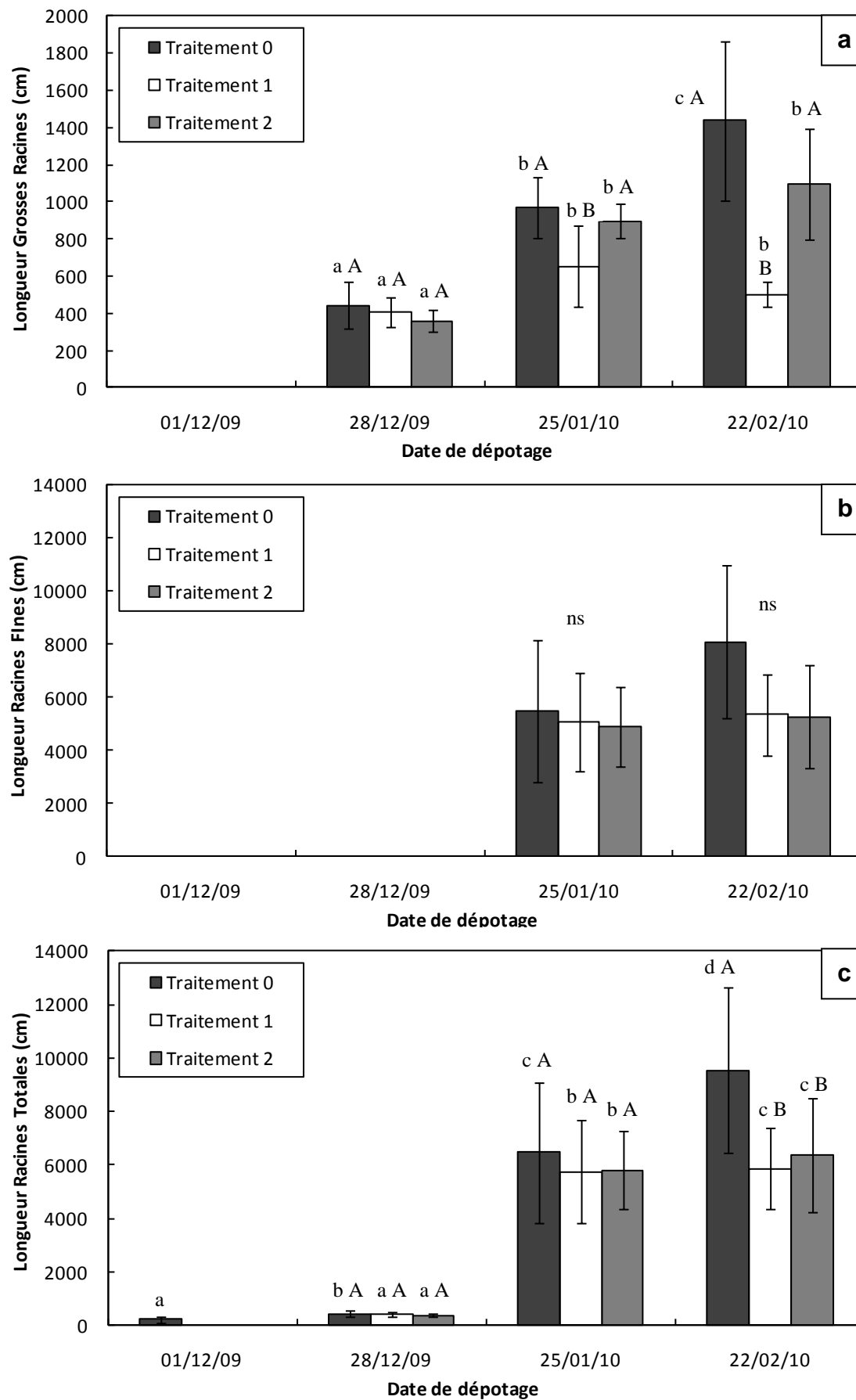


Figure 6 : Longueur (cm) des grosses racines (a), racines fines (b) et racines totales (c) par traitement et par date de dépôtage

Pour chaque traitement, les dates significativement différentes sont repérées par des lettres minuscules différentes (test de Tuckey, $p < 0,05$).

Pour chaque date, les traitements différents sont repérés par des lettres majuscules différentes (test de Tuckey, $p < 0,05$).

4.2.1.2 Longueurs racinaires

Pour chaque date de dépotage, les longueurs racinaires sont globalement plus faibles dans les traitements 1 et 2 que dans le traitement 0 (Figure 6). Pour les dates du 25/01/10 et 22/02/10, les longueurs des grosses racines dans le traitement 1 sont significativement inférieures à celles des traitements 0 et 2. Pour les petites racines, les longueurs ne sont pas significativement différentes entre traitements et entre dates. Les longueurs racinaires totales ne sont significativement différentes qu'à la date du 22/02/10 entre le traitement 0 d'une part, et les traitements 1 et 2 d'autre part. Elles augmentent entre les dates de manière significative quelque soit le traitement.

La croissance en longueur du système racinaire semble donc bien être limitée par les nématodes, les écarts entre traitements se creusant au cours du temps. Cet effet est particulièrement visible au niveau des grosses racines.

On remarque par ailleurs que les racines fines contribuent à environ 90% de la longueur racinaire totale.

4.2.1.3 Diamètre racinaire

Le diamètre moyen des grosses racines du traitement 0 est supérieur à celui du traitement 2, lui-même supérieur au traitement 1 (Figure 7a). Le diamètre moyen des grosses racines augmente significativement pour le traitement 2 uniquement.

Le diamètre moyen du système racinaire dans son ensemble augmente entre le 01/12/09 et le 28/01/10 puis diminue de manière significative à partir du 25/01/10 (excepté pour le traitement 1, entre le 25/01 et le 22/02). Les diamètres du traitement 1 sont légèrement inférieurs à ceux des traitements 0 et 2.

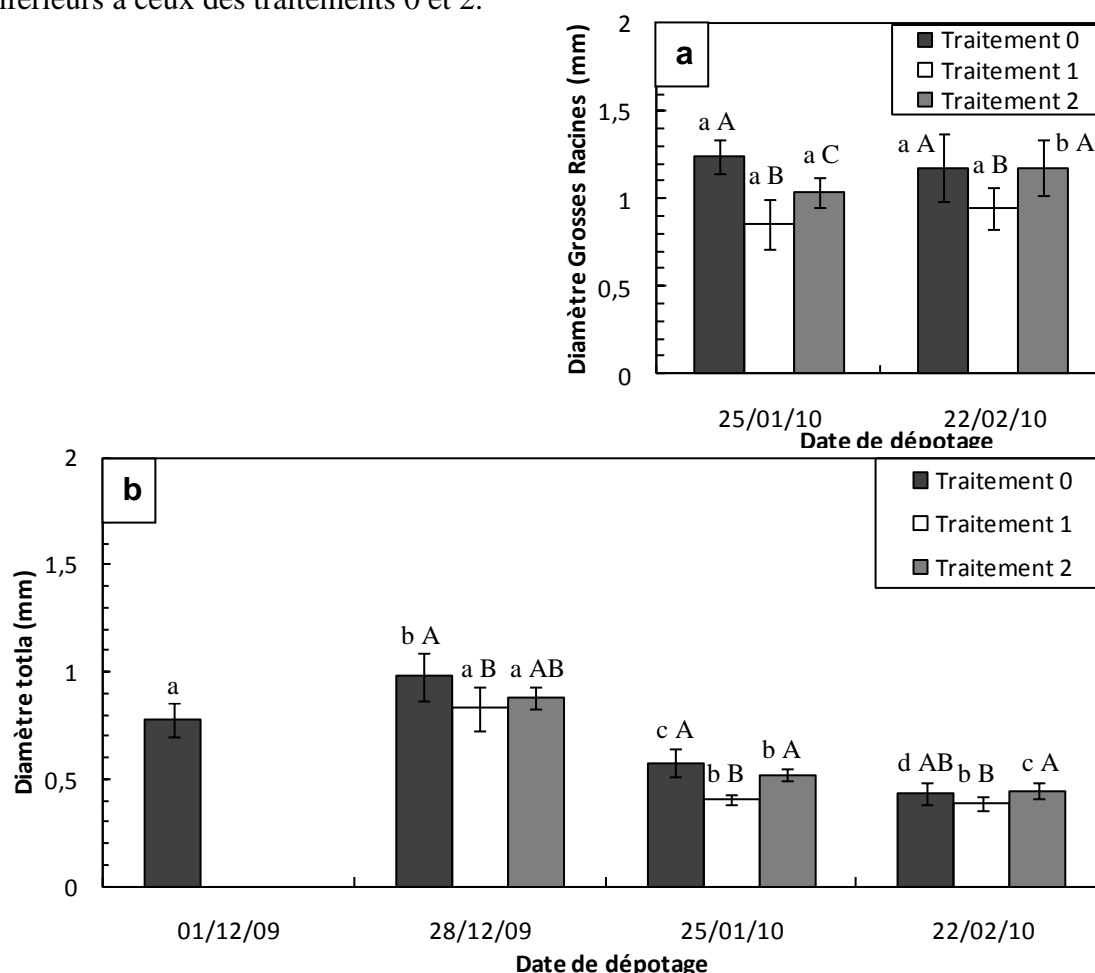


Figure 7 : Diamètres moyen (mm) des grosses racines (a) et totales (b) par date de dépotage et par traitement.

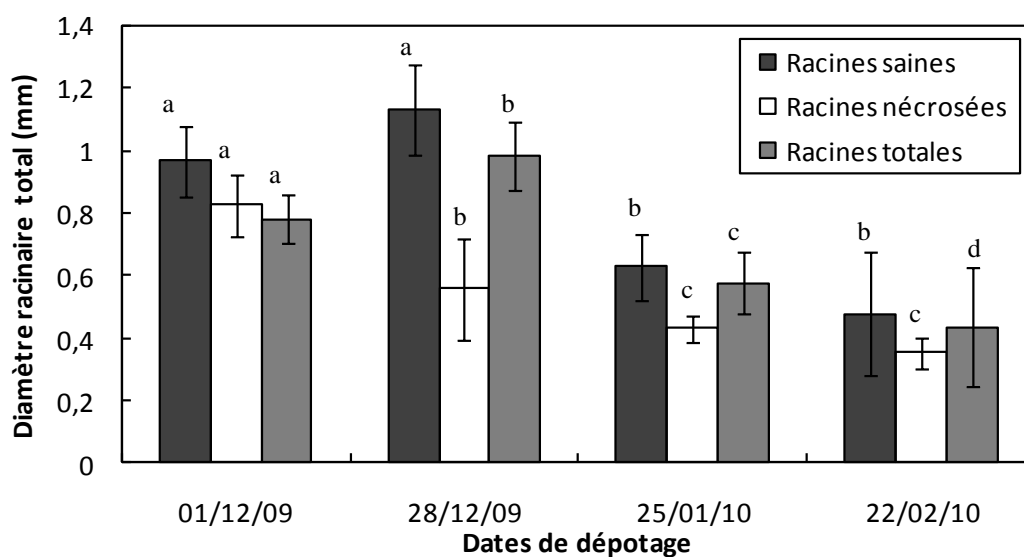


Figure 8 : Évolution du diamètre racinaire total en fonction de l'état sanitaire des racines (traitement 0)

Pour chaque traitement, les dates significativement différentes sont repérées par des lettres minuscules différentes (test de Tuckey, $p < 0,05$).

Pour chaque date, les traitements différents sont repérés par des lettres majuscules différentes (test de Tuckey, $p < 0,05$).

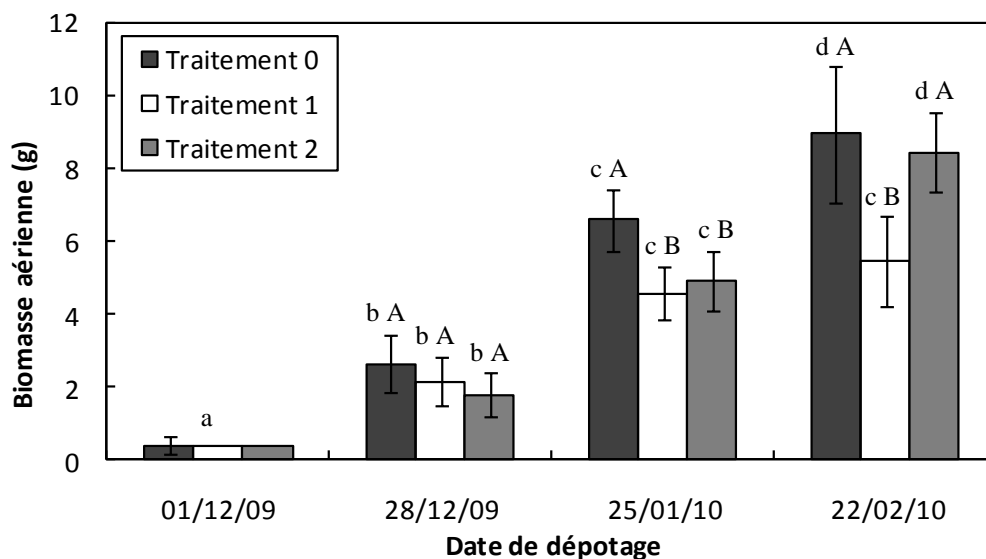


Figure 9 : Biomasse aérienne (g) par date de dépotage et par traitement

Pour chaque traitement, les dates significativement différentes sont repérées par des lettres minuscules différentes (test de Tuckey, $p < 0,05$).

Pour chaque date, les traitements différents sont repérés par des lettres majuscules différentes (test de Tuckey, $p < 0,05$).

Parallèlement, entre le 01/12/10 et le 28/01/10, le diamètre moyen des racines saines augmente alors que celui des racines nécrosées diminue (Figure 8 pour le traitement 0). Quelque soit le traitement, le diamètre des racines nécrosées a tendance à être inférieur à celui des racines saines (Figure 8 pour le traitement 0).

4.2.2 Croissance aérienne

4.2.2.1 Biomasse aérienne

La biomasse aérienne moyenne des plants de chaque traitement augmente au cours des dépotages (Figure 9). Néanmoins, on constate que la biomasse du traitement 1 est inférieure à celle des traitements 0 et 2. Ceci est de plus en plus marqué au cours des dépotages.

La vitesse de croissance aérienne, estimée par la pente de la relation biomasse – temps depuis le début de l'expérimentation, des bananiers du traitement 1 est inférieure à celle des bananiers du traitement 2, elle-même inférieure à celle des bananiers du traitement 0 (Figure 3).

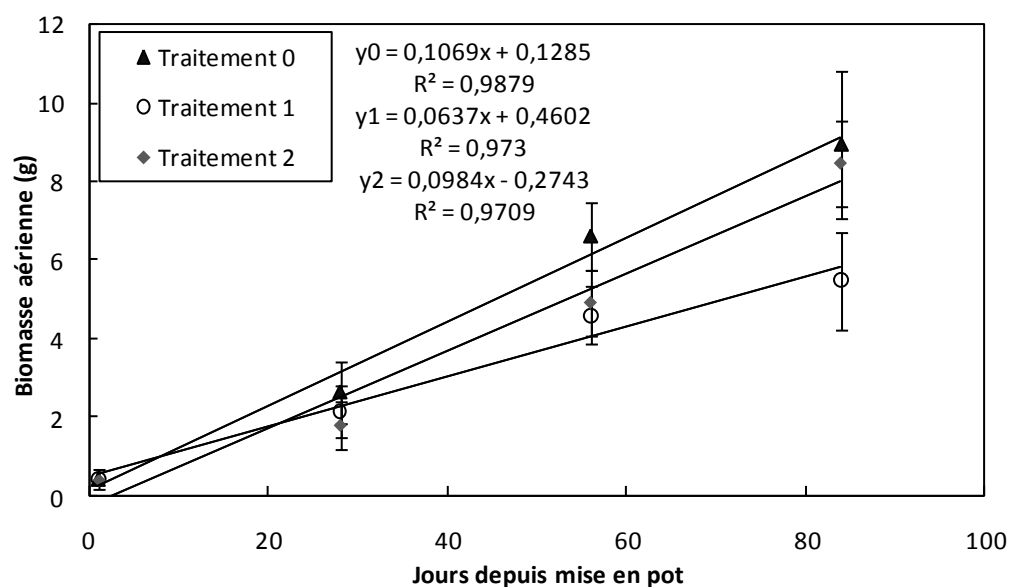


Figure 10 : Régression linéaire de la biomasse aérienne en fonction du nombre de jours après la mise en pot, par traitement

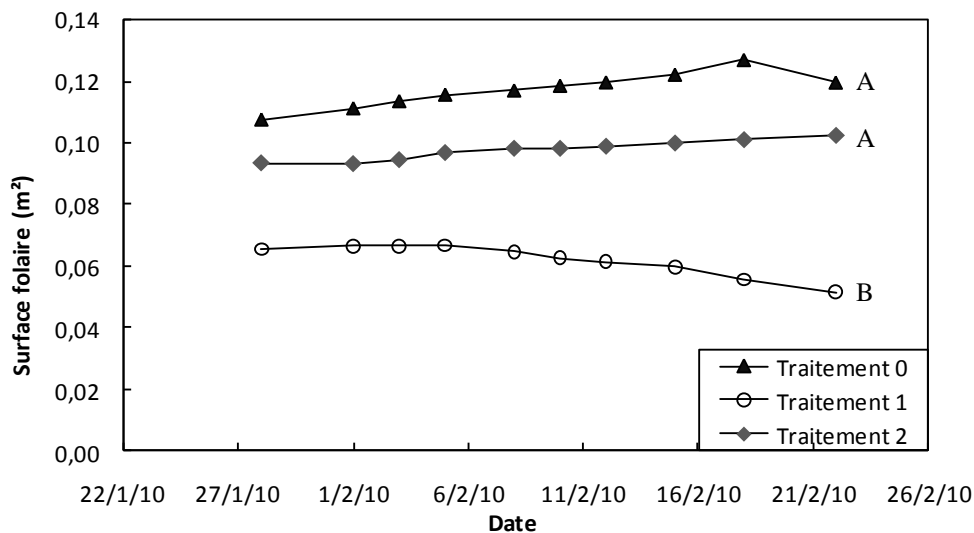


Figure 11 : Évolution de la surface foliaire par traitement
 Pour chaque traitement, toutes les dates sont significativement différentes. Les traitements différents du traitement 0 sont repérés par des lettres majuscules différentes (modèle mixte).

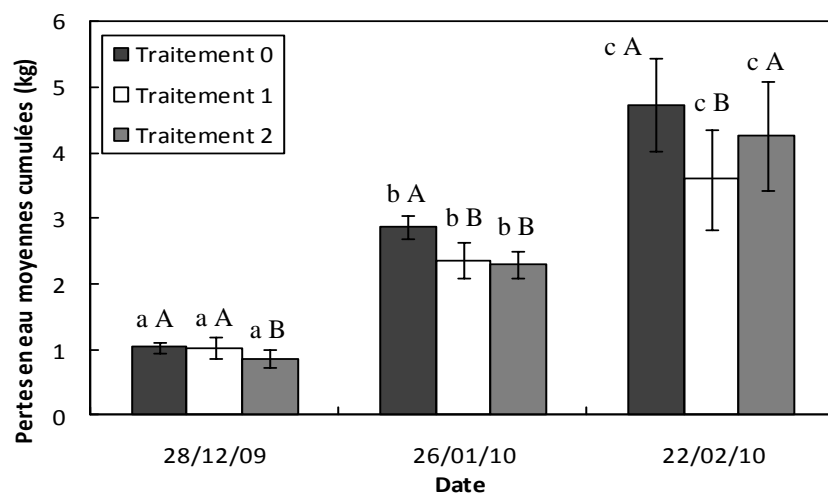


Figure 12 : Pertes en eau moyennes cumulées par traitement
 Pour chaque traitement, les dates significativement différentes sont repérées par des lettres minuscules différentes (test de Tuckey, $p < 0,05$).
 Pour chaque date, les traitements différents sont repérés par des lettres majuscules différentes (test de Tuckey, $p < 0,05$).

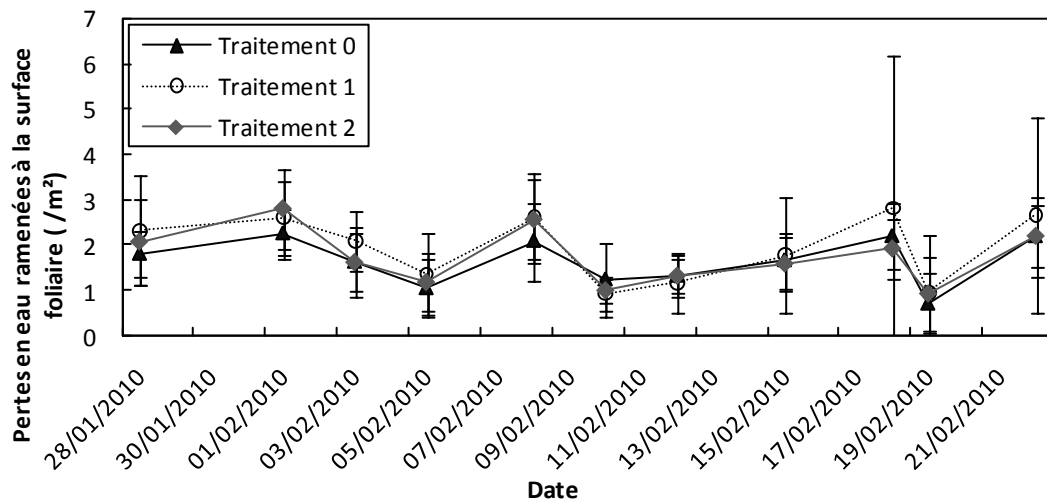


Figure 13 : Évolution des pertes en eau ramenées à la surface foliaire

4.2.2.2 Surface foliaire

Sur la période de mesures la surface foliaire du traitement 0 est supérieure, bien que non significativement, à celle du traitement 2 mais significativement supérieure à celle du traitement 1 (Figure 11). Au cours du temps, on observe une faible augmentation de surface foliaire pour les traitements 0 et 2 et une faible diminution pour le traitement 1.

4.2.3 Alimentation hydrique

Les pertes en eau cumulées depuis le début de l'expérimentation du traitement 1 sont inférieures dans le traitement 1 à celles du traitement 0. Les écarts se creusent au cours du temps (Figure 12).

Afin de s'affranchir de l'effet croissance, les pertes en eau ont été divisées par les surfaces foliaires (Figure 13). Les variations intra-traitements sont importantes et aucune différence entre traitement n'apparaît.

Les pertes en eau par m² cumulées depuis le début de l'expérimentation ont tendance à être supérieures pour le traitement 1 que pour les traitements 0 et 2. Néanmoins, ces différences entre traitements ne sont pas significatives (Figure 14).

Les évolutions des pertes en eau pondérées par la biomasse aérienne pour chaque traitement n'ont pas permis de mettre en évidence un quelconque effet du traitement (Figure 15).

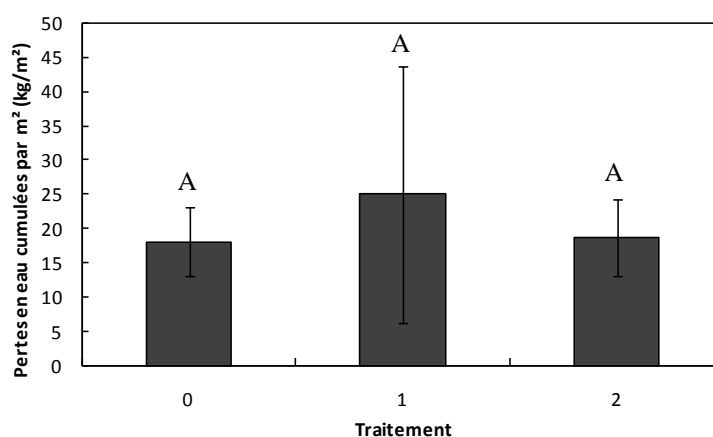


Figure 14 : Pertes en eau cumulées par m² (kg/m²) par traitement.
Les traitements différents sont repérés par des lettres majuscules différentes (test de Tuckey, $p < 0,05$).

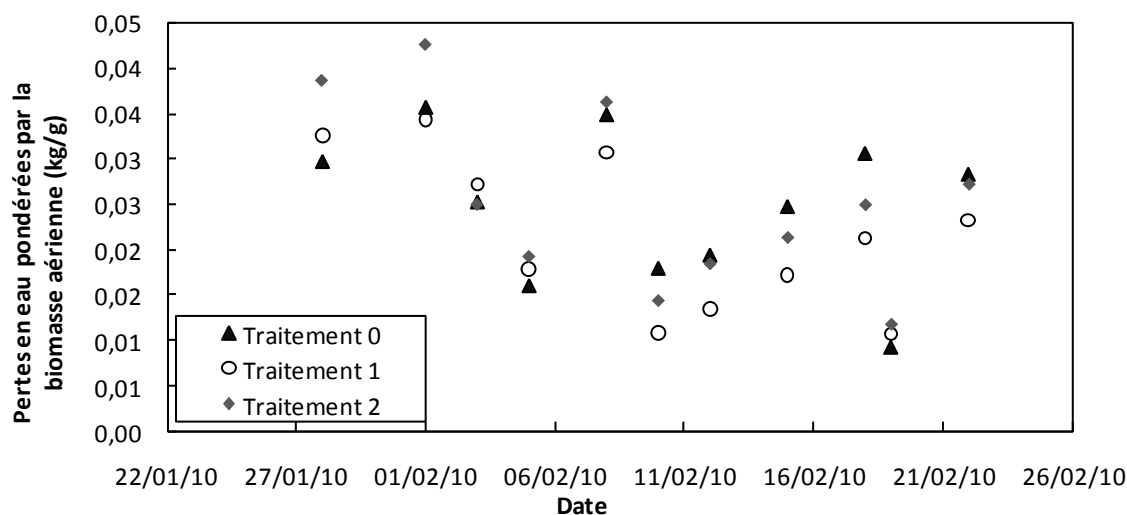


Figure 15 : Évolution des pertes en eau pondérées par la biomasse par traitement

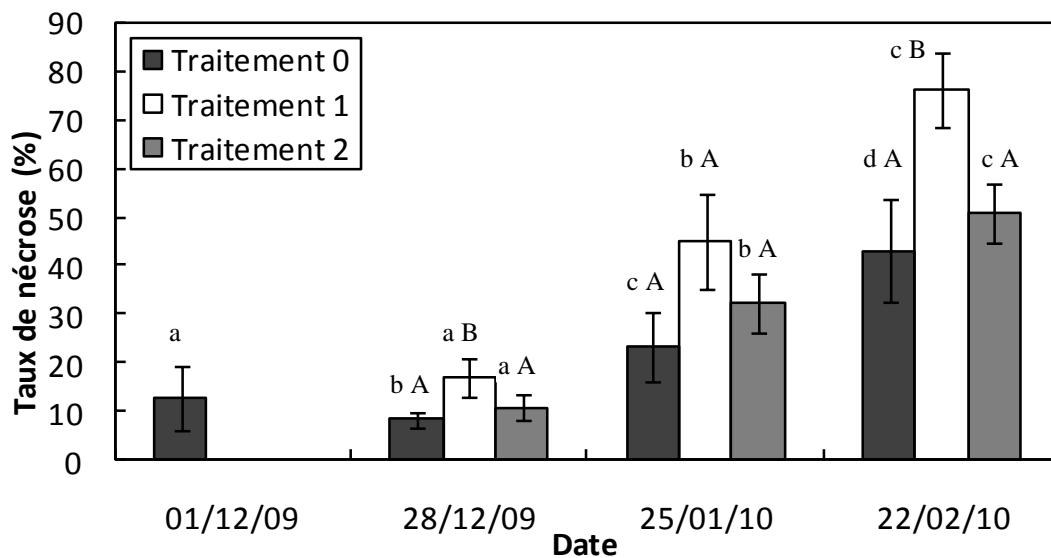


Figure 16 : Taux de nécrose des racines totales par date de dépotage et par traitement.
 Pour chaque traitement, les dates significativement différentes sont repérées par des lettres minuscules différentes (test de Tuckey, $p < 0,05$).
 Pour chaque date, les traitements différents sont repérés par des lettres majuscules différentes (test de Tuckey, $p < 0,05$).

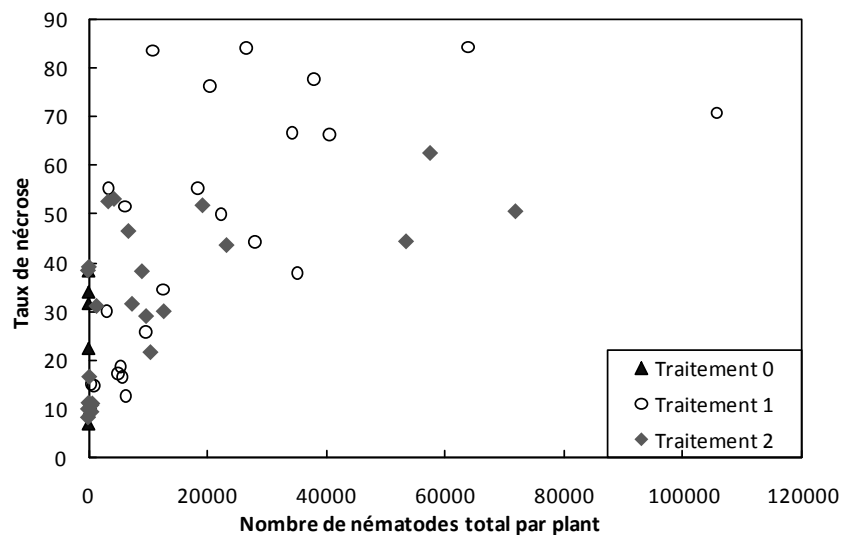


Figure 17 : Taux de nécrose racinaire par traitement en fonction du nombre de nématodes total par plant

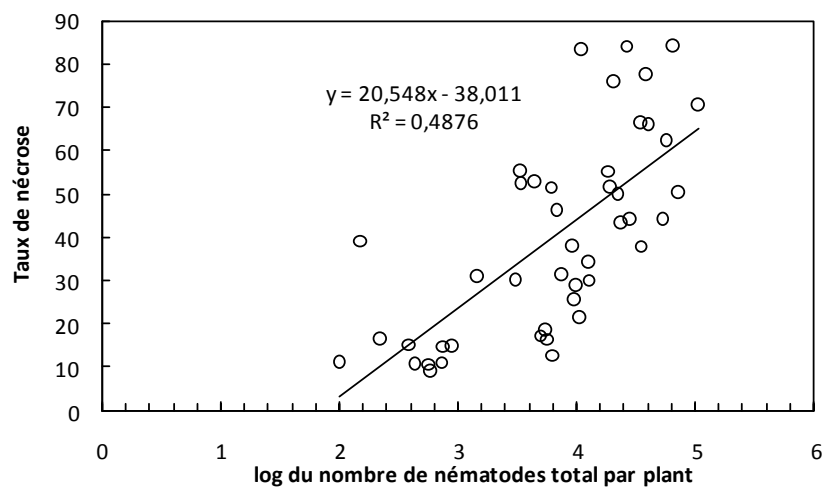


Figure 18 : Relation entre le taux de nécrose et le log du nombre de nématode total par plant

4.3 Utilisation de l'imagerie racinaire et du taux de nécrose racinaire comme indicateur de l'état sanitaire du bananier

4.3.1 Parasitisme tellurique et taux de nécrose racinaire

Le taux de nécrose, représentant la proportion de surface racinaire nécrosée, augmente au cours des dates de dépotage, quelque soit le traitement (Figure 16). Le taux de nécrose des racines des plants témoins n'est pas nul. Il varie entre 10 % en début d'essai et 40 % en fin d'essai. Le taux de nécrose du traitement 1 dépasse 70% en fin d'essai.

La relation entre taux de nécrose et nombre de nématode est délimité par une courbe enveloppe inférieure (Figure 17). Il semble donc exister un taux de nécrose minimal pour un nombre de nématodes donné. La dispersion des points est assez importante au-dessus de cette courbe enveloppe et augmente au cours des dépotages. Pour un nombre de nématodes donné, l'amplitude de variation du taux de nécrose est de 40%. Pour un certains nombre de plants, alors que le nombre de nématodes est nul, le taux de nécrose varie entre 5% et 40%. Le taux de nécrose maximal semble être de l'ordre de 85%. La relation entre le taux de nécrose des racines et le log du nombre de nématodes total par plant est à tendance linéaire (Figure 18).

4.3.2 Taux de nécrose et développement du bananier

La relation entre poids sec de racines et taux de nécrose est à tendance linéaire pour les trois traitements (Figure 19). Pour chaque traitement, les systèmes racinaires les plus développés sont les plus nécrosés. Les pentes des régressions sont très différentes entre traitement, les poids secs atteints dans le traitement 1 étant bien inférieurs à ceux atteints dans le traitement 2, puis 0. La croissance en biomasse du système racinaire est donc ralentie pour les traitements 1 et 2 par rapport au traitement 0.

En revanche, aucune tendance claire ne se dégage de l'évolution des longueurs racinaires totales par traitement en fonction du taux de nécrose (Figure 20). En effet, la longueur racinaire de nombreux plants est du même ordre de grandeur alors que les taux de nécrose correspondants varient sur près de 40% à l'intérieur d'un même traitement.

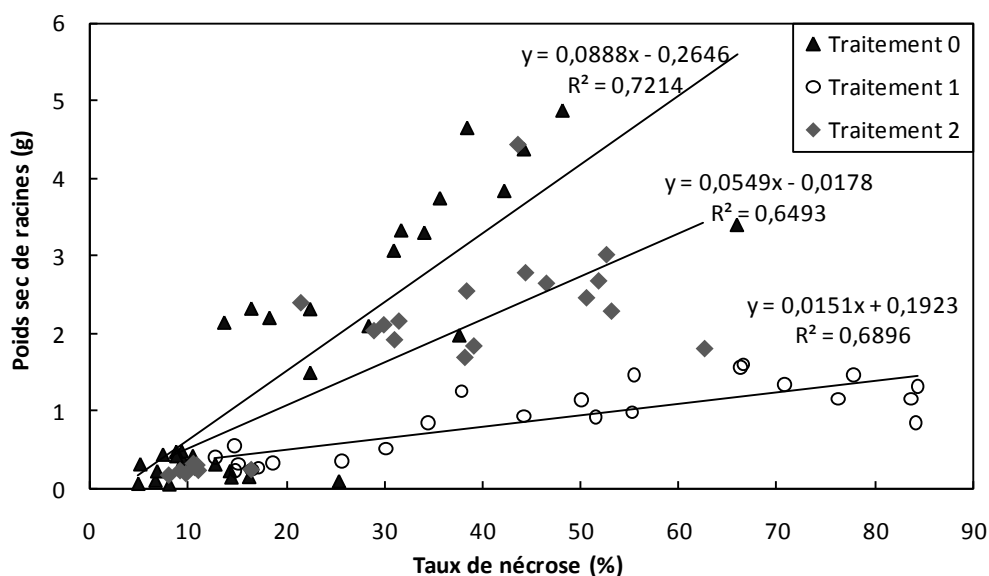


Figure 19 : Poids sec de racines par traitement en fonction du taux de nécrose. Les droites des régressions linéaires ainsi que leurs équations sont indiquées.

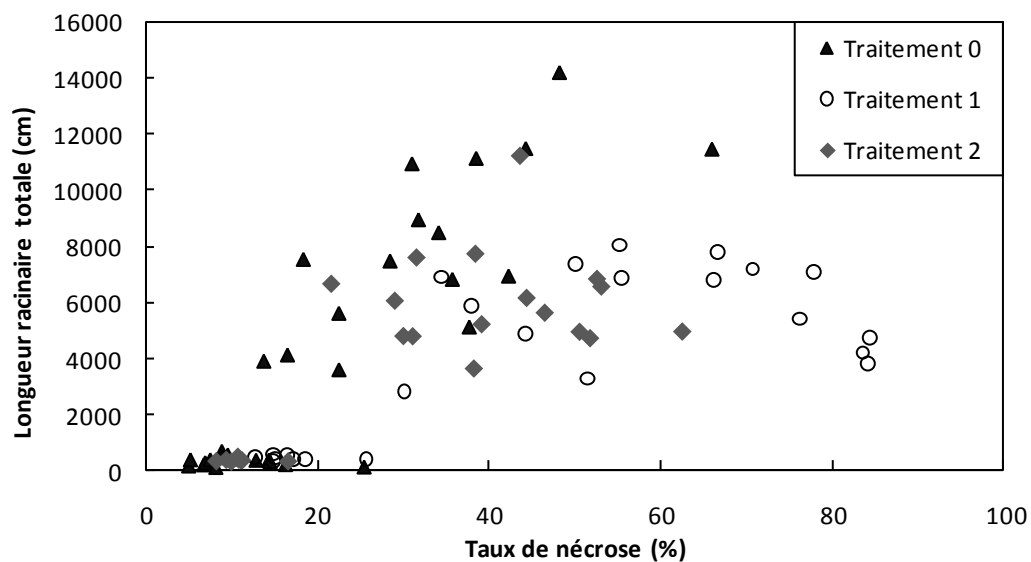


Figure 20 : Longueur racinaire totale par traitement en fonction du taux de nécrose

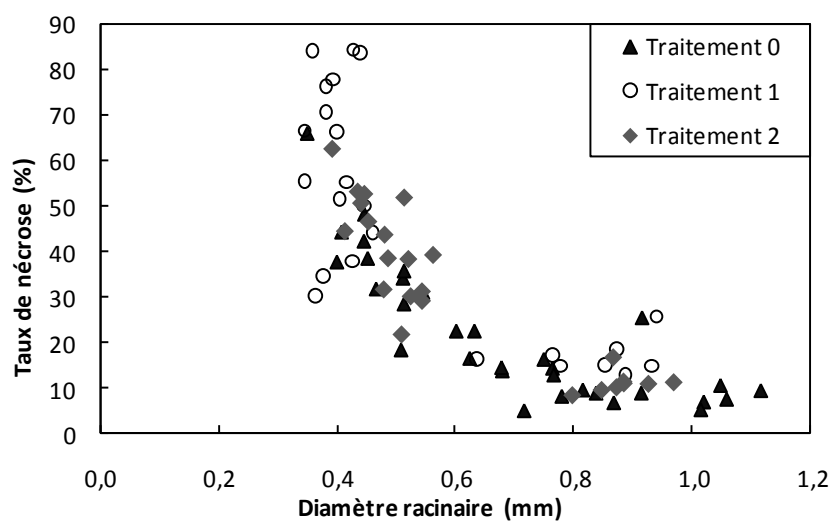


Figure 21 : Taux de nécrose racinaire en fonction du diamètre moyen des racines

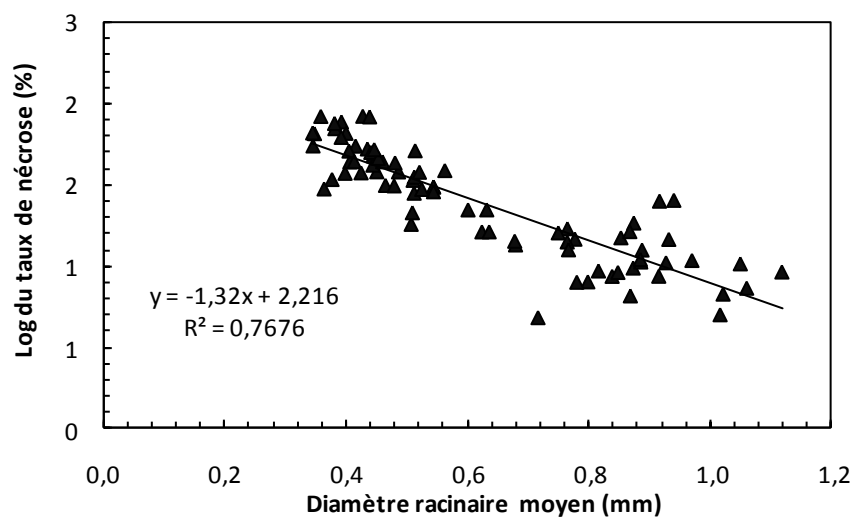


Figure 22 : Log du taux de nécrose en fonction du diamètre racinaire. Les droites des régressions linéaires ainsi que leurs équations sont indiquées.

La relation entre taux de nécrose et diamètre racinaire total (racines saines et nécrosées, grosses et fines) est assez bonne et de forme exponentielle négative : les racines les plus nécrosées sont les plus fines (Figure 21). La relation est générale, quelque soit le traitement.

Les relations entre la biomasse aérienne et le taux de nécroses racinaires sont assez bonnes pour les traitements 0 et 2 ($r^2=0,71$ et $0,84$ respectivement), un peu moins bonne pour le traitement 1 ($r^2=0,62$) (Figure 23).

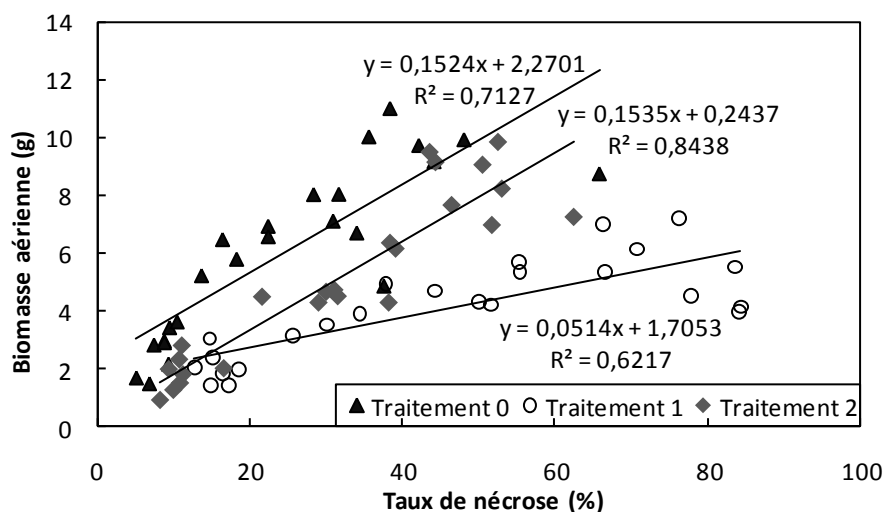


Figure 23 : Biomasse aérienne par traitement en fonction du taux de nécrose.
Les droites des régressions linéaires ainsi que leurs équations sont indiquées.

La surface foliaire et le taux de nécrose sont globalement linéairement reliés ($r^2=0,68$) (Figure 24).

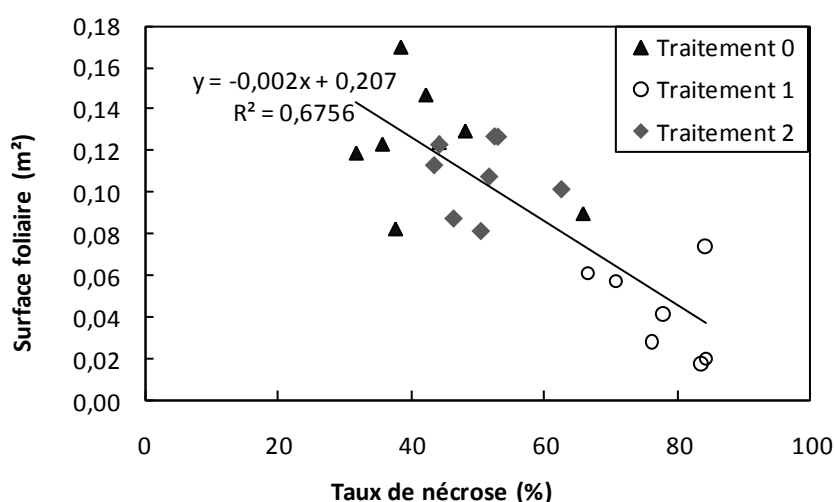


Figure 24 : Surface foliaire par traitement en fonction du taux de nécrose.
La droite de régression globale pour les trois traitements ainsi que son équation sont indiquées.

Les pertes en eau cumulées et le taux de nécrose ne semblent pas être reliées, quelque soit le traitement (Figure 25). De même pour les pertes en eau pondérées par la surface foliaire (Figure 26).

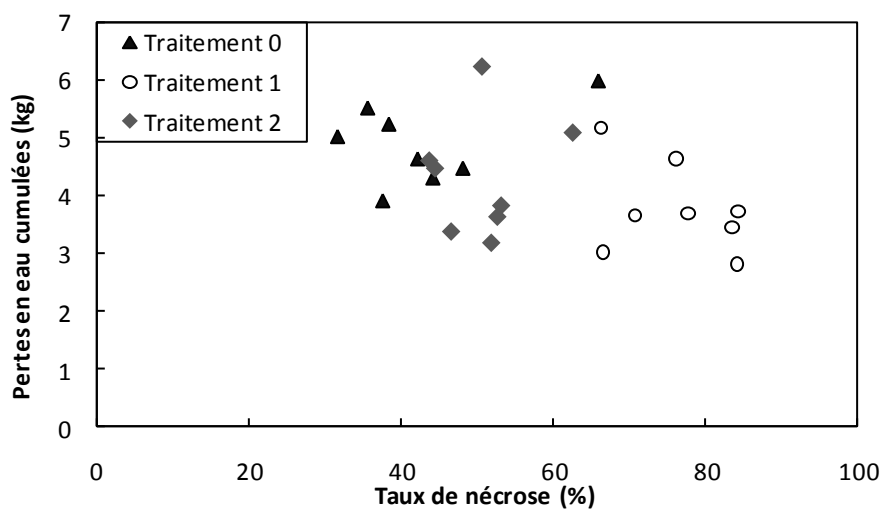


Figure 25 : Pertes en eau cumulées en fonction du taux de nécrose

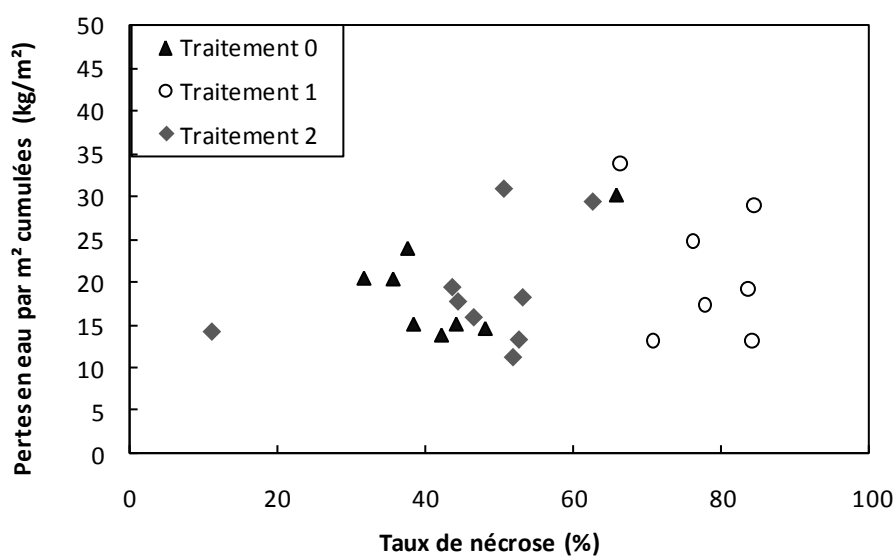


Figure 26 : Pertes en eau par m² cumulées en fonction du taux de nécrose

5 Discussion

5.1 Lien entre traitements et développement des populations parasites

Pour un même traitement et donc une même dose de nématodes inoculés en début d'essai, le nombre de nématodes par pot est très variable. Cela peut s'expliquer par un succès variable de l'inoculation et la variabilité de la vitesse de rencontre avec le système racinaire, donc de colonisation et de développement des nématodes. Par ailleurs, le nombre de nématode total cache un effet date, les plants présentant les nombres de nématodes totaux les plus importants étant ceux analysés les plus tardivement.

5.2 Effet du parasitisme tellurique sur le fonctionnement du bananier

5.2.1 Croissance et morphologie racinaires

Les nématodes diminuent les longueurs et la biomasse racinaires

L'effet des nématodes sur la croissance en longueur du système racinaire est surtout visible au niveau des grosses racines : diminution de 75% par rapport aux témoins après 3 mois d'essai pour le traitement 1 (inoculation de 1000 nématodes par pot), et de 25 % pour le traitement 2 (inoculation de 100 nématodes par pot). Au niveau des racines fines, les longueurs observées dans les traitements 1 et 2 ont tendance à être inférieures de 35% à celles observées dans le traitement 0 mais cette diminution n'est pas significative. Les racines fines étant plus difficiles à trier de la terre, et leur longueur plus difficile à mesurer, cela pourrait expliquer la forte variabilité des résultats et la non significativité des différences entre traitements. Enfin, au niveau des longueurs racinaires totales, la diminution est de près de 40% pour le traitement 1 par rapport au traitement 0 (33% pour le traitement 2).

Ces résultats montrent que les nématodes entraînent une réduction de la longueur du système racinaire du bananier, en particulier au niveau des grosses racines. Ceci n'est que partiellement en accord avec les conclusions de Treonis *et al.* (2007), qui a effectivement constaté sur le trèfle une diminution de la longueur du système racinaire, mais celle-ci était due à une diminution de la longueur des racines latérales.

De plus, et contrairement à ce qui a été observé par Treonis *et al.* (2007), la diminution de longueur racinaire s'accompagne ici d'une diminution de biomasse racinaire. Les différences observées entre traitements sont importantes : 65% de réduction de la biomasse racinaire comparé à la situation témoin après 3 mois d'expérimentation pour le traitement 1, et 25% pour le traitement 2. Ces différences peuvent être dues à un ralentissement de la croissance ou aux pertes de racines nécrosées causées par le parasitisme tellurique. Des diminutions de biomasse racinaire similaires ont été observées par Mukasa *et al.* (2006) pour des concentrations de nématodes dans les racines 100 fois inférieures, sur des variétés de bananiers différentes. La variété utilisée ici est donc assez résistante aux nématodes.

La croissance du système racinaire du bananier est donc diminuée par les nématodes. Par conséquent, la zone de sol colonisée par les racines est moins étendue. L'accès aux ressources est moins important. Cela peut entraîner une moins bonne alimentation hydrominérale de la plante, et donc aggraver son retard de croissance.

En présence de nématodes, les diamètres des racines sont plus faibles

La croissance du système racinaire explique l'augmentation du diamètre moyen du système racinaire observée entre le 01/12/09 et le 28/12/09 pour les traitements 0 et 2. En effet, le diamètre à l'émission des racines augmente au cours de la croissance du bananier (Lecompte, 2002). A partir du 28/12/09, le diamètre du système racinaire dans son ensemble diminue nettement, quelque soit les traitements. La détermination du diamètre moyen se faisant en pondérant les diamètres par les longueurs des racines présentant ce diamètre. Deux raisons peuvent donc expliquer cette diminution : i) diminution de la longueur et/ou du diamètre des grosses racines, ii) augmentation de la longueur des racines fines (i.e. ramification du système racinaire). Le diamètre des grosses racines est stable et la longueur des grosses racines augmente donc la première hypothèse est écartée. La deuxième hypothèse n'a pas pu être confirmée car une augmentation de la longueur des racines fines n'est observée que pour le traitement 0 et n'est pas significative. Il faudrait tester de nouveau l'hypothèse en séparant les deux types de racines dès le premier dépotage.

Les nématodes ont un effet sur le diamètre moyen mesuré des grosses racines : diminution entre 20 et 30 % pour le traitement 1 par rapport au traitement 0 témoin selon la date. Ceci peut s'expliquer par i) un ralentissement de la croissance du système racinaire causé par les nématodes (à une même date, les traitements avec et sans nématodes ne sont pas au même stade de développement et de ramification de leur système racinaire) ; ii) la présence de réitérations au niveau des racines primaires dont l'apex aurait été endommagé par les nématodes (les réitérations étant reconnues pour être de diamètre légèrement inférieur à la racine principale chez le bananier (Lecompte, 2002)) ; iii) une stimulation de la ramification du système racinaire par les nématodes qui s'attaqueraient davantage aux racines primaires. Les deux dernières hypothèses ont un impact en termes de coût de construction pour la plante, peut-être au détriment de la croissance aérienne.

Au niveau du diamètre des racines totales, une diminution de 10 à 30 % (20% en moyenne) selon les dates est observée pour le traitement 1 par rapport au traitement 0. Ceci peut s'expliquer par i) des diamètres et/ou longueurs de grosses racines plus faibles pour le traitement 1 par rapport au traitement 0, ii) des longueurs de racines fines plus importantes dans le traitement 1 par rapport au traitement 0. La deuxième hypothèse n'est pas confirmée car aucun effet des nématodes sur la longueur des racines fines n'a pu être significativement observé. Mais l'hypothèse ne peut pas être complètement écartée car le tri des racines fines étant plus difficile et les images racinaires plus perturbées, les erreurs plus importantes commises sur les racines fines pourraient cacher un effet des nématodes. En revanche, la première hypothèse est confirmée par la diminution de la longueur et du diamètre des grosses racines des bananiers du traitement 1 par rapport au traitement 0.

Il semble donc que si le parasitisme tellurique modifie la morphologie du système racinaire, cela passe par une diminution du diamètre et de la longueur racinaire des grosses racines, mais pas par des modifications au niveau des racines fines. Il s'agit en fait davantage d'un retard de croissance que de modifications de la morphologie du système racinaire. En plus de limiter l'accès aux ressources, celle-ci peut compromettre le second rôle du système racinaire, son rôle d'ancrage. Or le système racinaire adventif du bananier est déjà particulièrement peu stable et peu résistant, aux cyclones en particulier. Des chutes de plants de bananiers plus importantes sont donc à attendre dans des parcelles très infestées par les nématodes.

Les racines fines sont les plus nécrosées

Quelque soit les traitements, les diamètres des racines nécrosées sont inférieurs de 30% en moyenne à ceux des racines saines. Par ailleurs, le taux de nécrose racinaire augmente lorsque le diamètre racinaire diminue. Ces deux résultats tendent à montrer i) que les nématodes s'attaquent davantage aux racines fines, ou alors ii) que les racines fines sont plus sensibles

aux nécroses. La seconde hypothèse est appuyée par le fait que les nécroses ne sont pas forcément causées par les nématodes : le taux de nécrose important des racines dans le traitement 0 sans nématodes en est la preuve (entre 10 et 60 %). Pour trancher entre les hypothèses ci-dessus, il serait intéressant d'étudier la différence de diamètre entre racines saines et racines nécrosées pour les traitements 1 et 2 en la rapportant à celle observée pour le traitement 0.

Les racines les plus nécrosées sont donc les racines les plus fines, c'est-à-dire celle ayant un rôle majeur dans l'absorption hydro-minérale. Si les nématodes accentuent cette tendance, la capacité d'absorption du système racinaire en sera d'autant plus réduite.

5.2.2 Croissance aérienne

La biomasse aérienne est significativement diminuée de 40% en fin d'essai sur le traitement 1 par rapport au traitement 0 (5% sur le traitement 2, ns). En termes de surface foliaire, la diminution observée est de près de 60 % en fin d'essai entre le traitement 1 et le traitement 0 (significatif). Cette diminution est la conséquence de l'impact des nématodes sur le système racinaire : la zone de sol explorée est diminuée et par là même la quantité de ressources pouvant être mobilisée, ce qui aggrave les diminutions de biomasses aériennes et racinaires. L'hypothèse selon laquelle les nématodes entraînent une diminution de la croissance aérienne est donc confirmée. Ceci est en accord avec ce qui a été observé par Mukasa *et al.* (2006) sur le bananier (diminution jusqu'à 40% de la biomasse aérienne avec une concentration de nématodes dans les racines 100 fois inférieur à celle observée dans notre essai).

5.2.3 Alimentation hydrique

Le parasitisme tellurique entraîne de moindres pertes en eau des plants, une moindre transpiration : diminution de 25% en fin d'essai pour le traitement 1 par rapport au traitement 0. Les pertes en eau pondérées par la surface foliaire ne sont pas différentes entre traitements. De même pour les pertes en eau pondérées par la biomasse (graphique non présenté). La transpiration ramenée à l'unité de surface ou de biomasse transpirante n'est donc pas modifiée par la présence de nématodes parasites des racines. L'hypothèse d'un effet des nématodes sur les conductivités hydriques de la plante n'est donc pas confirmée. Cependant, il se peut que des erreurs expérimentales dues à des pertes en eau par évaporation du sol que l'on n'aurait pas pu éviter, ou à des imprécisions d'arrosage aient perturbé les résultats et soient responsables de la forte variabilité observée dans les pertes en eau/m². L'hypothèse d'un effet des nématodes sur la capacité même du bananier à prélever l'eau (effet sur les trajets hydriques) ne peut donc pas tout à fait être écartée.

Il se peut également que les effets des nématodes au niveau de la biomasse racinaire et aérienne ne soient pas suffisants pour induire une réponse secondaire, relative aux régulations hydriques, de la plante à ce stade de développement ou dans ces conditions de culture. Il serait alors intéressant de reproduire l'expérience avec des plants soumis à un stress hydrique et/ou azoté afin d'évaluer si l'effet de ces stress s'ajoute simplement à l'effet des nématodes ou si une interaction se manifeste.

5.3 Utilisation de l'imagerie racinaire et du taux de nécrose racinaire comme indicateur de l'état sanitaire du bananier

5.3.1 Parasitisme tellurique et taux de nécrose racinaire

Il convient tout d'abord de remarquer que le taux de nécrose du traitement 0 n'est pas nul. Les racines des bananiers non inoculés avec des nématodes sont donc quand même nécrosées, à un taux allant de 10% en début d'essai jusqu'à 40% en fin d'essai. Cela s'explique par le fait que les nématodes ne sont pas la seule cause des nécroses. Des champignons colonisant des

blessures existant sur les racines, une anoxie des racines, ou la croissance en pot et les chocs sur les parois qu'elle occasionne sont des sources possibles de mortalité des tissus racinaires. Il convient dans tous les cas de relativiser les taux de nécroses observés dans les traitements 1 et 2 en fonction du traitement 0 sans nématodes.

Le taux de nécrose du traitement 1 est supérieur de 80% par rapport à celui du traitement 0 en fin d'essai (20% pour le traitement 2 par rapport au traitement 0). L'effet des nématodes sur la réduction de la surface racinaire fonctionnelle est donc confirmé. La relation entre le taux de nécrose et le logarithme du nombre de nématodes total par plant, suggérée par Moens *et al.* (2001), est médiocre ($R^2 : 0,4876$). Ceci peut s'expliquer par la forte variabilité du taux de nécrose pour une même pression parasitaire, et inversement. De plus, la variabilité du taux de nécrose augmente lorsque la pression parasitaire augmente, suggérant des sensibilités différentes des bananiers. De plus, puisque les nécroses peuvent aussi être provoquées par des champignons, il s'agit d'une pression supplémentaire dont la variabilité entre les pots n'est pas contrôlée dans notre essai. Les champignons colonisant les racines pourraient donc aussi expliquer en partie la variabilité des taux de nécrose pour une même pression de nématodes. A partir de la relation entre le taux de nécrose et le nombre de nématodes total par plant, une courbe enveloppe peut néanmoins être déterminée. Elle correspond à un taux de nécrose minimal pour un nombre de nématodes total par plant donné. Des relations similaires ont pu être mises en évidences avec le nombre de nématode dans le sol par pot ou dans les racines par plant (résultat non présentés), mais pas avec la concentration en nématodes dans le sol ou dans les racines. Pourtant, de telles relations pourraient-être utiles pour prévoir un taux de nécrose racinaire minimal à partir d'une concentration de nématodes mesurée sur une parcelle de culture.

Remarque : La limitation du taux de nécrose à 85% est due au fait que l'on a éliminé les plants morts de l'expérimentation. Il semble donc qu'au delà d'un taux de nécrose de 85%, la plante ne survit pas.

5.3.2 Taux de nécrose racinaire et développement du bananier

L'observation en surface de la couleur des racines pour déterminer le taux de nécrose et quantifier l'attaque des nématodes peut être discutée. En effet, nous avons vu que les nécroses ne sont pas seulement dues aux nématodes mais aussi aux champignons, au contact avec des obstacles (roches ou parois de pots), à une anoxie, etc (Delvaux *et al.*, 1989). La détermination d'un taux de nécrose global est-elle alors suffisante pour décrire les effets des nématodes sur le développement du bananier ?

Les relations entre biomasse racinaire, aérienne ou surface foliaire et le taux de nécrose sont linéaires. Ceci s'explique certainement par le fait que le taux de nécrose est lié à l'âge des plants. Or les plants les plus âgés sont ceux aux biomasses aériennes et racinaires les plus importantes mais ce sont également les plus nécrosés puisque la pression parasitaire augmente au cours du temps.

Les biomasses aériennes et racinaires atteintes par les plants du traitement 1 sont inférieures à celles du traitement 0, ce qui confirme ce qui avait été observé par traitement : les nématodes limitent la croissance. A titre d'exemple, la biomasse racinaire d'un plant nécrosé à 50 %, inoculé avec 1000 nématodes (traitement 1), est diminuée de 35% par rapport à un plant non inoculé du même âge.

L'effet sur les longueurs racinaires n'est pas aussi clair que sur la biomasse racinaire. Ceci peut être dû à la forte variabilité des longueurs, en particulier pour le traitement 1. Les résultats sont plus visibles sur les longueurs des grosses racines, sur lesquelles l'effet des nématodes avait déjà été montré par traitement.

Au vu des résultats obtenus, l'observation du taux de nécrose racinaire permet de tirer les mêmes conclusions que celles des observations par traitement. Le taux de nécrose racinaire renseigne donc bien sur l'effet des nématodes sur le fonctionnement et l'état sanitaire du bananier.

A terme, il serait donc possible de traduire en termes d'impact sur les biomasses racinaire et aérienne les conséquences d'un taux de nécrose mesuré à partir d'images racinaires obtenues après des prélèvements en parcelles de culture. Les images racinaires pourraient permettre de prévoir les pertes de rendements en biomasse causées par les nématodes. Il faudrait pour cela confirmer certains résultats obtenus en parcelle et corriger les variabilités importantes observées.

La relation entre le logarithme du nombre de nématode total par plant et le taux de nécrose pourrait en théorie également être utilisée pour prévoir un taux de nécrose racinaire à partir de mesures de l'infestation par les nématodes sur les parcelles. Cependant l'ajustement observé de cette relation reste médiocre ($R^2=0,4876$), mais surtout, l'évaluation en parcelle d'un nombre total de nématodes par plant semble peu réaliste. En effet, il s'agirait de i) pouvoir estimer la quantité totale de nématodes contenue dans tous le système racinaire, ii) pouvoir estimer la quantité de nématodes contenue dans le volume de sol colonisé par les racines, ce qui n'a pas vraiment de sens compte tenu des migrations éventuelles des nématodes entre bananiers.

Dans l'hypothèse ou une telle relation pourrait être plus correctement établie et ou l'on disposerait d'outils et méthodes permettant de la transposer à l'échelle de la parcelle, les relations « logarithme du nombre de nématodes total par plant – taux de nécrose racinaire » et « taux de nécrose racinaire – biomasses racinaire ou aériennes » pourrait permettre de prévoir en terme de biomasses les conséquences d'une attaque parasitaire caractérisée par des mesures au champ.

6 Conclusion

Dans cette étude, il apparaît que les effets du parasitisme tellurique sur le bananier ne sont visibles qu'en moyenne par traitement. Ils n'ont pas pu être reliés au nombre de nématodes par plant qui est trop variable. Il a été montré que le parasitisme tellurique entraîne une diminution de la longueur du système racinaire, en particulier des grosses racines, associée à une diminution de la biomasse racinaire. Aucune modification de la morphologie du système racinaire par les nématodes n'a pu être observée. Au niveau aérien, une diminution de la biomasse aérienne a été constatée. L'effet direct des nématodes sur la croissance racinaire et aérienne est donc confirmé. En revanche, aucun effet indirect des nématodes sur l'alimentation hydrique n'a pu être observé.

L'analyse d'images racinaires et le calcul d'un taux de nécrose a permis de confirmer que les nématodes entraînent une diminution de la surface racinaire fonctionnelle. Il a également été montré que les racines les plus fines sont les plus nécrosées, ce qui laisse présager une moindre capacité d'absorption racinaire. Des relations entre le nombre de nématodes par plant et le taux de nécrose d'une part, et le taux de nécrose et la croissance aérienne et racinaire d'autre part, ont pu être mises en évidence. Il s'agit maintenant de préciser ces relations pour éventuellement prévoir, à partir de mesures d'infestations parasitaires au champ, la réduction de biomasse attendue sur les bananiers.

7 Bibliographie

- Araya, M, De Waele, D et Vargas, R. 2002.** Occurrence and population densities of nematode parasites of banana (*Musa AAA*) roots in Costa Rica. *Nematopica*. 2002, Vol. 32, 1, pp. 21-33.
- Araya, M. et De Waele, D. 2005.** Effect of weed management on nematode numbers and their damage in different root thickness and its relation to yield of banana (*Musa AAA* cv. Grande Naine). *Crop Protection*. 2005, Vol. 24, 7.
- Davin, Stéphane. 2008.** Agriculture : un plan pour la banane durable. *Le Journal du Développement Durable*. [En ligne] 5 Décembre 2008. <http://www.developpementdurablejournal.com/spip.php?article3717>.
- Delvaux, B et Guyot, Ph. 1989.** Caractérisation de l'enracinement du bananier au champ. Incidences sur les relations sol-plante dans les bananeraies intensives de la Martinique. *Fruits*. 1989, Vol. 44, 12, pp. 633-647.
- Dorel, Marc. 1989.** *Le système racinaire du bananier (synthèse bibliographique)*. s.l. : IRFA, 1989.
- Fogain, Roger et Gowen, R. Simon. 2005.** Root morphology and development of banana and plantain root. *Fruits*. 2005, Vol. 60, 5, pp. 297-302.
- Guadeloupe Informations.** La culture de la banane. *Guadeloupe Informations*. [En ligne] <http://www.guadeloupe-informations.com/La-culture-de-la-banane>.
- Kashaija, IN et al. 2004.** Spatial distribution of roots, nematode populations and root necrosis in highland banana in Uganda. *Nematology*. 2004, Vol. 6, pp. 7-12.
- Kirkpatrick, T.L., VanIersel, M.W. et Oosterhuis, D.M. 1995.** Influence of *Meloidogyne incognita* on the water relations of cotton grown in microplots. *Journal of Nematology*. 1995, Vol. 27, pp. 465-471.
- Lecompte, François. 2002.** *Mise en place de l'architecture racinaire du bananier dans un andosol : effets des contraintes physiques liées au compactage (thèse)*. s.l. : INA-PG, CIRAD-FHLOR, INRA, 2002.
- Lecompte, François et al. 2002.** Number, Position, Diameter and Initial Direction of Growth of Primary Roots in *Musa*. *Annals of Botany*. 2002, Vol. 90, pp. 43-51.
- Lecompte, François, Ozier-Lafontaine, Harry et Pages, Loïc. 2003.** An analysis of growth rates and directions of growth of primary roots. *Agronomie*. 2003, Vol. 23, pp. 209-218.
- Moens, T. A. S., Araya, M et De Waele, D. 2001.** Correlations between nematode numbers and damage to banana (*Musa AAA*) roots under commercial conditions. 2001, Vol. 31, 1, pp. 55-65.
- Mukasa, H.H. et al. 2006.** Effect of a multispecies nematode population on the root, corm, and shoot growth of East African *Musa* genotypes. *Biology and Fertility of Soils*. 2006, Vol. 43, pp. 229-235.
- Sasanelli, N., D'Addabbo, T. et Liskova, M. 2006.** Influence of the root-knot nematode *Meloidogyne incognita* r. 1 on growth of grapevine. *Helminthologia*. 2006, Vol. 43, pp. 168-170.
- Treonis, A.M. et al. 2007.** Effects of a plant parasitic nematode (*Heterodera trifolii*) on clover roots and soil microbial communities. *Biology and Fertility of Soils*. 2007, Vol. 43, pp. 541-548.
- Verschoor, B.C., De Goede, R.G.M. et Brussaard, L. 2002.** Do plant parasitic nematodes have differential effects on the productivity of a fast- and a slow-growing grass species? *Plant and Soil*. 2002, Vol. 243, pp. 81-90.
- Wilcox, D.A. et Loria, R. 1986.** Water relations, growth, and yields in two snap bean cultivars infected with root knot nematode, *Meloidogyne hapla* (chitwood). *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 1986, Vol. 111, 1, pp. 34-38.

8 Annexes

8.1 La recherche agronomique pour le développement au CIRAD

Le Cirad est un centre de coopération en recherche agronomique spécialisé dans les productions tropicales et méditerranéennes. C'est un établissement public placé sous la double tutelle du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et du ministère des Affaires étrangères et européennes.

Ses activités relèvent des sciences du vivant et de la terre, des sciences sociales et des sciences de l'ingénieur appliquées à l'agriculture, la forêt, l'élevage, l'alimentation, les ressources naturelles et les territoires ruraux.

Le Cirad comprend trois départements scientifiques, qui rassemblent l'ensemble de ses unités de recherche : Systèmes biologiques (Bios), Performances des systèmes de production et de transformation tropicaux (Persyst), Environnements et sociétés (ES).

Le Cirad emploie 1 800 agents, dont 800 ingénieurs chercheurs. Il coopère avec plus de 90 pays dans le monde et dispose de pôles scientifiques à vocation régionale dans l'outre-mer français. Il accueille et forme chaque année près de 800 chercheurs et techniciens.

Le budget du Cirad s'élève à 203 millions d'euros, dont les deux tiers proviennent de l'État français.

Afin de concentrer ses moyens sur des questions critiques, le CIRAD a identifié six axes stratégiques prioritaires pour fédérer son effort de recherche :

1. Contribuer à inventer une agriculture écologiquement intensive pour nourrir la planète
2. Étudier les conditions d'émergence et les modalités de mise en valeur des bioénergies en faveur des populations du Sud
3. Innover pour une alimentation accessible, diversifiée et sûre
4. Anticiper et gérer les risques sanitaires infectieux liés aux animaux sauvages et domestiques
5. Accompagner les politiques publiques pour la réduction des inégalités structurelles et de la pauvreté
6. Mieux comprendre les relations entre l'agriculture et l'environnement et entre les sociétés humaines et la nature, pour gérer durablement les espaces ruraux

8.2 Contexte économique de la culture de banane aux Antilles

La banane est le premier fruit consommé dans le monde. La demande est concentrée aux Etats-Unis et dans l'Union européenne, qui absorbent plus des 2/3 des volumes exportés et constituent des marchés aux enjeux financiers considérables.

Les bananes arrivant sur le marché européen ont trois origines (chiffres pour l'année 2008, (UGPBAN)) :

- 3,8 M de tonnes de banane d'Amérique Latine, dite « banane dollar » en raison de la forte implication de multinationales américaines tant au niveau de la production que de la mûrisserie
- 900 000 de tonnes de banane d'Afrique et des autres pays ACP (Afrique Caraïbe Pacifique), en particulier la République Dominicaine
- 600 000 tonnes de banane communautaire, en provenance de Guadeloupe et Martinique, Canaries, Madère, Crête et Chypre

A côté de l'écrasante suprématie de la banane dollar, la production de banane de la Guadeloupe et Martinique représentent peu de volume à l'échelle du marché européen : une production annuelle de 270 000 tonnes dont 250 000 destinées aux marchés métropolitains et européens (Davin, 2008). Il s'agit néanmoins de la première production et de la première exportation en volume pour ces départements (45%) et elle génère plus de 10 000 emplois (source Guadeloupe Informations).

En Guadeloupe, la surface en 2005 était de 2500 ha, pour des exportations de 50 000 t (source Agreste).

La culture de banane s'est fortement développée dans les années 50 et la crise de la canne, dans les années 70, a achevé d'imposer la banane comme spécialisation dominante dans le sud de la Basse-Terre et la Côte-au-Vent où se trouvent 80% des exploitations. La sole bananière diminue depuis les années 90. Elle est passée de 9000 ha, son maximum au milieu des années 60, à 2500 ha en 2005 (source Agreste).

Le conflit de la banane

Depuis les années 90, la banane est devenue l'enjeu d'une guerre commerciale opposant les multinationales américaines, soutenues par Washington, à l'Union européenne.

Mis en place en 1993 par l'Union Européenne, l'Organisation Commune de Marché de la Banane (OCMB) avait pour rôle de préserver les intérêts des producteurs de banane communautaires. En effet, elle permettait une mise sur le marché libre de la banane d'origine communautaire, limitait et taxait les importations de la banane dollar et limitait les importations de banane ACP.

Ce règlement fut jugé discriminatoire et en contradiction avec les lois du libre échange, en particulier par les États-Unis. Suite aux plaintes de cinq pays d'Amérique Latine devant l'OMC en 1994, l'UE convint d'augmenter le contingent tarifaire et de diminuer les droits de douanes, en échange d'un engagement de ces cinq pays à ne pas attaquer l'OCMB jusqu'en 2003. L'OCMB fut de nouveau attaquée devant l'OMC en 1996 par cinq autres pays d'Amérique Latine, avec le soutien des États-Unis qui menaça l'UE de rétorsions commerciales sur certains produits européens. L'OCMB fut condamné par l'OMC en septembre 1997. L'UE dut donc réformer son système d'importation de banane avant le 1^{er} janvier 1999. UE et États-Unis peinèrent à trouver un accord, jusqu'en 2001.

La disparition des contingentements et la diminution des taxes pour les bananes des pays non communautaires se poursuivit jusqu'à l'abrogation définitive du règlement au 31 décembre 2007 (passage à une OCM unique Fruits et Légumes). Depuis cette date, la banane dollar

n'est plus soumise à un contingent mais uniquement à une taxe à l'importation. Le montant de cette taxe diminue d'année en année, cette valeur étant déjà inférieure à celle préconisée par les producteurs communautaire (Association des Producteurs Européens de Banane) pour stabiliser les entrées de bananes des pays tiers sur le marché européen. Depuis le 1^{er} janvier 2008, les fournisseurs ACP bénéficient d'un approvisionnement totalement libre, sans quotas ni taxe.

En conséquence de ces modifications, les quantités de banane dollar arrivant sur le marché européen augmentent et la banane communautaire est moins protégée. Cela fragilise la pérennité de la banane communautaire face à la concurrence des pays tiers qui sont favorisés par un faible coût de production. Les perspectives pour la culture de banane aux Antilles sont donc assez sombres, d'autant plus que la production reste tributaire des aléas climatiques (un cyclone tous les 7 à 8 ans en moyenne).

Il s'agit donc pour la culture de banane aux Antilles de devenir plus durable, d'un point de vue environnemental, économique et social. Une évolution vers des bananes de qualité labélisée, et non plus seulement satisfaisant une qualité standard, devrait permettre de justifier leur tarif et une plus grande compétitivité face à la banane dollar.

Les efforts portent sur la différenciation du produit : origine précisée (banane de montagne par exemple) et pratiques agricoles clairement tracées (agriculture biologique, commerce équitable).

La diversification des exploitations est également un moyen d'assurer leur durabilité.

8.3 Le Plan Banane Durable

Le Plan Banane Durable est un contrat de modernisation qui a été signé entre le Ministre de l'Agriculture et l'UGPBAN (Union des Groupements de Producteurs de Banane) le 3 décembre 2008. Il a pour objectif de relancer la filière de la banane antillaise et de l'engager vers des pratiques plus respectueuses de l'environnement.

L'accord, prévu jusqu'en 2013 avec le CIRAD, les conseils régionaux et les conseils généraux de Guadeloupe et de Martinique s'inscrit dans « Ecophytodom », volet spécialement adapté aux cultures ultra-marines du plan «Ecophyto 2018» du Grenelle de l'environnement, qui prévoit de réduire de moitié les quantités de pesticides utilisées d'ici 10 ans.

Ce plan vise à encourager les producteurs de banane à utiliser moins de produits phytosanitaires et privilégier les techniques alternatives (naturelles ou raisonnées) de protection des cultures. Le plan prévoit la création d'un Institut Technique de la Banane, chargé de diffuser aux planteurs les techniques innovantes mises au point par les centres de recherche (CIRAD, CEMAGREF) dans le domaine environnemental. Des pratiques culturales innovantes, avec des plantes de couvertures, sont ainsi expérimentées. Elles doivent permettre de limiter la croissance des adventices et donc de réduire la consommation d'herbicide, mais aussi d'améliorer la nutrition de la plante et sa tolérance aux bioagresseurs. Cet institut travaille également au développement de nouvelles variétés résistantes aux maladies, en particulier la cercosporiose noire, à partir de croisement de variétés sauvages.

Le plan bénéficie d'un soutien de 8 millions d'euros (Seguier, 2008) et les premiers résultats sont encourageants. En 2009, 80% des 270 000 t de bananes produites en Guadeloupe et Martinique ont respecté le cahier des charges du Plan Banane Durable (Boughriet, 2010).

8.4 Protocole d'extraction racinaire

METHODE D'EXTRACTION DE NEMATODES A PARTIR DE RACINES

Technique de centrifugation-flottation basée sur celle de Coolen et D'Herde (1972).

- ▣ Les racines sont préalablement nettoyées pour éliminer le maximum de grains de sable.
- ▣ Elles sont découpées en petits morceaux puis broyées avec un mixeur (Braun MX 32) 2 fois 5 secondes à vitesse maximale.
- ▣ On verse le broyat sur une colonne de tamis de différentes ouvertures de mailles (de bas en haut : **25 μ** , 50 μ , 80 μ , 200 μ).
- ▣ On lave 1 à 2 minutes (jet relativement puissant : forme " pinceau "), le contenu du tamis 200 μ , puis le refus est jeté.
- ▣ Les 3 autres tamis sont lavés doucement puis le refus de chacun d'entre eux est récupéré dans un godet à centrifuger.
- ▣ 2 cuillères à café de kaolin sont ajoutées dans les godets à centrifuger.
- ▣ On met en suspension à l'aide du vibro-mélangeur (\varnothing 2cm).
- ▣ On centrifuge à 3000tr/mn pendant 5mn.
- ▣ Le surnageant est jeté.
- ▣ On remplit jusqu'à 200ml avec du sulfate de magnésium (densité : **1,18 à 1,20**)
- ▣ Remettre le culot en suspension avec le vibro-mélangeur (\varnothing 2cm).
- ▣ Centrifuger à 3000tr/mn pendant 5 mn.
- ▣ On verse le surnageant sur un tamis de 5 μ que l'on récupère dans un tube gradué pour effectuer le comptage.

MATERIEL NECESSAIRE

-
- Centrifugeuse avec godets de 250ml minimum.
 - Vibreux-mélangeur de \varnothing 2cm et \varnothing 5cm.
 - Batterie de tamis : 80 μ , 50 μ , 32 μ , et 5 μ .
 - Balance d'équilibrage.
 - Passoire, sceau, cuillère.
 - Bêchers.
 - Tubes à essai gradués : 50ml, 200ml.
 - Colonne de Seinhorst

PRODUIT CHIMIQUE

- Kaolin
- Sulfate de magnésium $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.

Laboratoire de Nématologie CIRAD/FLHOR

8.5 Protocole d'élutriation

Méthode d'élutriation de Seinhorst

Il s'agit d'une méthode d'extraction des nématodes du sol (Seinhorst, 1956) très efficace mais un peu coûteuse en raison de l'installation nécessaire. Cette technique est parfaitement adaptée quand un grand nombre d'analyses de sol sont nécessaires (cas des enquêtes diagnostic, recherche, etc...)

Équipement

- Une batterie d'élutriateurs de Seinhorst (modèle IRD disponible) avec les débitmètres eau correspondants (20 à 80 ml/minute)
- Des Erlenmeyers de 2 litres avec les embouts coniques correspondants (modèle IRD disponible)
- 1 entonnoir en plastique
- 1 cuvette en plastique 1 litre
- Quelques béchers de 250 cm³
- 1 passoire à grosse maille
- 1 pissette à eau
- 3 tamis à maille de 50 µm
- Quelques tamis artisanaux (PVC et toile moustiquaire, à fabriquer selon modèle)
- Quelques tubes de comptage gradués (25, 50, 100 ml)

Procédure

- Un volume de 250 cm³ de terre est prélevé à partir de l'échantillon initial à l'aide d'un bécher et est ensuite mélangé et dispersé dans un litre d'eau au dessus du tamis à grosse maille afin de retenir graviers et grosses racines dans une petite cuvette en plastique. Le mélange en suspension est ensuite introduit dans l'erlenmeyer de 2 litres à l'aide d'un entonnoir. On complète à ras avec de l'eau de rinçage.
- Après agitation, l'erlenmeyer et son embout conique sont placés au dessus de la colonne d'élutriation de Seinhorst, préalablement remplie d'eau, bouchée à sa base et parcourue par un courant d'eau ascendant (80 ml par minute). Les particules de sol sédimentent rapidement dans le bas de la colonne tandis que les nématodes et les débris organiques demeurent en suspension dans l'erlenmeyer et le sommet de la colonne d'élutriation. Au sommet de la

colonne, le trop plein d'eau avec les nématodes et les débris organiques s'écoule dans un seau de 10 litres.

- Au bout de 20 minutes, le contenu de l'erlenmeyer est à son tour versé dans le seau de 10 litres et l'élutriation continue pour encore 10 minutes à 50 ml par minute.
- Au bout de 10 minutes, c'est le contenu de la colonne (au-dessus de la partie qui a sédimenté) qui est recueilli dans le seau de 10 litres.
- On laisse le contenu du seau sédimenter à son tour quelques minutes avant de verser l'ensemble de la suspension au-dessus d'une batterie de 4 tamis de 50 µm.
- Le refus de chaque tamis est récupéré dans un bécher de 250 ml avant d'être lui même délicatement renversé au dessus d'un tamis à grosse maille (PVC et toile moustiquaire) qui sert en fait de support à une double épaisseur de tissus de cellulose (cf méthode de Baerman). Le tamis est ensuite posé au dessus d'un couvercle de boîte de Pétri (ou d'une assiette en plastique) et laissé au repos afin de récupérer les nématodes vivants dans une solution propre et limpide.
- Au bout de 24 à 48 heures, on récupère la solution dans un tube gradué (100, 50, 25 ml) avant de procéder au comptage sur un aliquote de la solution à la dilution désirée.

Référence :

Selhorst, H. 1962. Modifications of the elutriation method for extraction nematodes from soil. *Nematologica* 8, 117-128.

8.6 Tables d'ANOVA

	dl	P
date	2	< 0.001
traitement	2	< 0.001
date * traitement	4	< 0.001

Table d'ANOVA sur le poids sec de racines

	dl	P
date	2	< 0.001
traitement	2	< 0.001
date * traitement	4	< 0.001

Table d'ANOVA sur le logarithme des longueurs des grosses racines

	dl	P
date	2	0.15472
traitement	1	0.07755
date * traitement	2	0.31406

Table d'ANOVA sur le logarithme des longueurs des racines fines

	dl	P
date	2	0.02282
traitement	2	< 0.001
date * traitement	4	0.27389

Table d'ANOVA sur les longueurs des racines totales

	dl	P
date	2	< 0.001
traitement	2	< 0.001
date * traitement	4	0.02885

Table d'ANOVA sur les diamètres des grosses racines

	dl	P
date	2	< 0.001
traitement	2	< 0.001
date * traitement	4	0.02553

Table d'ANOVA sur les diamètres moyens des racines totales

	dl	P
date	2	< 0.001
traitement	2	< 0.001
date * traitement	4	< 0.001

Table d'ANOVA sur la biomasse aérienne

	dl	P
date	2	< 0.001
traitement	2	< 0.001
date * traitement	4	0.003259

Table d'ANOVA sur le log des pertes en eau moyennes cumulées

	dl	P
date	2	0.4073

Table d'ANOVA sur le logarithme des pertes en eau cumulées pondérées par la surface foliaire

	dl	P
date	2	< 0.001
traitement	2	< 0.001
date * traitement	4	0.004555

Table d'ANOVA sur le logarithme du taux de nécrose des grosses racines